DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C Dissertationen Heft Nr. 645

Thomas Luhmann

Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie

München 2010

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5057-0

DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C Dissertationen Heft Nr. 645

Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie

Von der Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften
der Technischen Universität Dresden
genehmigte Habilitationsschrift

von

Dr.-Ing. Thomas Luhmann

München 2010

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5057-0

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 ● D – 80 539 München

Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 ● Telefax +49 – 89 – 23 031 - 1283/ - 1100

e-mail hornik@dgfi.badw.de ● http://www.dgk.badw.de

Erklärung:

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Habilitation zum Thema:

„Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie“

wird hiermit bestätigt. Die Habilitationsschrift wurde von mir selbst und ohne andere als die darin angegebenen Hilfsmittel angefertigt. Die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen wurden als solche gekennzeichnet.

Dresden, am 28.9.2009 Dr.-Ing. Thomas Luhmann

Gutachter: Prof. Dr.sc.tech.habil. Hans-Gerd Maas, Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing.habil. Christian Heipke, Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.rer.nat. Ralf Reulke, Humboldt Universität Berlin

© 2010 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5057-0

Das Equipment, welches wir gebrauchen spielt nur eine kleine Rolle.
Vielmehr kommt es darauf an, es zu beherrschen.

Sam Abell, Fotograf, USA

Für Ute, Maike, Birger und Nico

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung ... 9
1.1 Motivation ... 9
1.2 Photogrammetrische Kamerakalibrierung ... 10
1.3 Historische Aspekte ... 12
1.4 Begriffe und Definitionen ... 14
1.4.1 Kalibrierung ... 14
1.4.2 Justierung und Eichung ... 15
1.4.3 Qualitätsmaße ... 16
1.4.4 Kamerakonstante ... 18
1.4.5 Photogrammetrische Begriffe der Kalibrierung ... 20
1.5 Zum Aufbau dieser Arbeit ... 22
2 Systemaspekte ... 24
2.1 Aufnahmekonzepte ... 24
2.1.1 Offline-Verfahren mit vorkalibrierter Kamera ... 24
2.1.2 Offline-Verfahren mit unkalibrierter Kamera ... 25
2.1.3 Online-Verfahren mit vorkalibrierter Kamera ... 26
2.1.4 Online-Verfahren mit unkalibrierter Kamera ... 29
2.2 Ein allgemeines Modell zur Systemkalibrierung ... 30
2.2.1 Objektraum ... 31
2.2.2 Optischer Bildraum ... 32
2.2.3 Digitaler Bildraum ... 33
2.2.4 Fazit ... 33
3 Physikalische Grundlagen ... 34
3.1 Lichtwellen ... 34
3.1.1 Elektromagnetisches Spektrum ... 34
3.1.2 Brechung und Reflexion ... 35
3.1.3 Beugung ... 36
3.2 Optische Abbildung ... 37
3.2.1 Konstruktion der optischen Abbildung ... 37
3.2.2 Bündelbegrenzung ... 38
3.2.3 Projektionszentrum ... 39
3.2.4 Abbildungsfehler ... 39
3.2.4.1 Verzeichnung ... 40
3.2.4.2 Chromatische Aberration ... 41
3.2.4.3 Sphärische Aberration ... 42
3.2.4.4 Astigmatismus und Bildfeldwölbung ... 43
3.2.4.5 Koma ... 43

3.3 Photogrammetrische Modelle ... 44
3.3.1 Projektionszentrum, Bildhauptpunkt und Verzeichnung ... 44
3.3.2 Asymmetrische Abbildungsfehler ... 45
3.3.2.1 Dezentrierung von Linsen ... 45
3.3.2.2 Sensorschiefe ... 46
3.3.2.3 Unebene Bildfläche ... 46
4 Standardmodelle zur Kamerakalibrierung ... 48
4.1 Zentralprojektion im Raum ... 48
4.1.1 Koordinatensysteme ... 48
4.1.2 Photogrammetrische Abbildungsgleichungen ... 50
4.1.3 Lineare Abbildungsmodelle ... 50
4.1.3.1 Direkte Lineare Transformation ... 50
4.1.3.2 Perspektivische Projektionsmatrix ... 52
4.2 Bildfehler beschreibende Funktionen ... 53
4.2.1 Radial-symmetrische Verzeichnung ... 54
4.2.1.1 Standardparameter der Photogrammetrie ... 54
4.2.1.2 Alternative Verzeichnungsansätze ... 57
4.2.2 Tangentiale und asymmetrische Verzeichnung ... 58
4.2.3 Sensorparameter ... 58
4.2.4 Korrektur der Bildkoordinaten ... 58
4.3 Analytische Verfahren ... 61
4.3.1 Einzelbildverfahren ... 61
4.3.1.1 Projektive Verfahren ... 61
4.3.1.2 Erweiterter räumlicher Rückwärtsschritt ... 61
4.3.2 Mehrbildverfahren ... 62
4.3.2.1 Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung ... 62
4.3.2.2 Kalibrierung mit nur einem Maßstab ... 66
5 Erweiterte Verfahren und Modelle ... 68
5.1 Brechungsabhängige Modelle ... 68
5.1.1 Entfernungsabhängige Verzeichnung ... 68
5.1.2 Chromatische Aberration ... 70
5.1.2.1 Farbabhängige Kalibrierung ... 71
5.1.2.2 Längenmessabweichung ... 73
5.1.2.3 Fazit ... 73
5.1.3 Mehrmedien-Abbildung ... 74
5.1.3.1 Lichtbrechung an Trennflächen ... 74
5.1.3.2 Erweitertes Modell der Bündeltriangulation ... 78
5.2 Lokale Bilddeformationen ... 79
5.2.1 Finite Elemente ... 80
5.2.2 Sichtstrahlkalibrierung ... 86

5.3 Bildvariante Kalibrierung ... 87
5.3.1 Bildweise Variation von Kamerakonstante und Hauptpunkt ... 88
5.3.2 Modellierung von Gravitationseinflüssen ... 89
5.4 Besondere Objektivformen ... 90
5.4.1 Objektive mit variabler Brennweite ... 90
5.4.2 Objektive mit großen Öffnungswinkeln ... 94
5.4.2.1 Abbildungsmodelle für Fisheye-Objektive ... 94
5.4.2.2 Winkelabhängige Verzeichnungskorrektur ... 96
5.5 Aufnahmesysteme mit besonderen Strahlengängen ... 98
5.5.1 Panoramakameras ... 98
5.5.1.1 Zylindrisches Abbildungsmodell ... 98
5.5.1.2 Kalibrierung von Panoramakameras ... 101
5.5.2 Spiegelsysteme ... 103
5.5.2.1 Konstruktionen ... 103
5.5.2.2 Kameramodell ... 106
5.5.2.3 Praktische Versuche ... 107
6 Kalibrierung und Genauigkeit ... 111
6.1 Qualitätskriterien ... 111
6.1.1 Innere Genauigkeit ... 111
6.1.2 Äußere Genauigkeit ... 116
6.1.3 Relative Genauigkeit ... 117
6.2 Digitalkameras mit fester Brennweite ... 118
6.2.1 Prüfkörper ... 118
6.2.2 Untersuchungen ... 119
6.2.3 Bewertung ... 125
6.3 Digitalkamera mit Vario-Objektiv ... 126
6.3.1 Prüfkörper ... 126
6.3.2 Untersuchungen ... 127
6.3.2.1 Bildinvariante Kalibrierung ... 127
6.3.2.2 Bildvariante Kalibrierung ... 128
6.3.2.3 Einführung eines Symmetriepunktes ... 131
6.3.3 Bewertung ... 132
6.4 Fazit ... 133
7 Zusammenfassung und Ausblick ... 134
8 Literatur ... 136
Abkürzungen ... 143
Danksagung ... 144

1 Einführung

1.1 Motivation

Photogrammetrie umfasst alle technischen und wissenschaftlichen Aspekte, die es erlauben, aus einem oder mehreren bildhaften Aufnahmen eines beliebigen Objektes dieses in seiner Lage und Form dreidimensional zu rekonstruieren und inhaltliche Interpretationen über das abgebildete Objekt abzuleiten. Diese Grundidee gilt seit Erfindung der Photogrammetrie und wurde durch die technologischen Entwicklungen der letzten 150 Jahre ständig erweitert.

Die Frage der optischen Qualität und der geometrischen Modellierung der eingesetzten Kameras bestimmt seit jeher wesentlich die Leistungsfähigkeit der Photogrammetrie. Photogrammetrie ist vor allem dort sehr erfolgreich, wo hinsichtlich der Kameraqualität und der verwendeten mathematischen Abbildungsmodelle höchste Präzision erreicht wird. Dies kann zum einen am Beispiel klassischer Luftbildkameras verdeutlicht werden, die durch Hochleistungsobjektive, extrem stabile mechanische Konstruktion und aufwändige Justierung und Kalibrierung zu hochproduktiven und leistungsfähigen Aufnahmesystemen entwickelt wurden. Zum anderen wurden in der Photogrammetrie schon früh analytische 3D-Auswerteverfahren höchster Genauigkeit entwickelt, mit denen neben der eigentlichen Objektrekonstruktion auch die innere geometrische Modell der eingesetzten Kameras verifiziert oder optimiert werden konnte. Die Kalibrierung bildgebender Aufnahmesysteme gehört also zu den Grundaufgaben der Photogrammetrie.

Der klassische photogrammetrische Prozess gliedert sich in vier Stufen:

1. Aufnahme des Objektes mit einer Messkamera
2. Bildmessung (Pass- und Verknüpfungspunkte)
3. Orientierung der aufgenommenen Bilder
4. 2D- oder 3D-Objektrekonstruktion

In diesem Prozess sind Vorverarbeitungsschritte wie z.B. Aufnahmeplanung, Objektpräparation, Einmessung von Passpunkten etc. und Nachbearbeitungsschritte wie Ergebnisdarstellung und -analyse nicht enthalten. Die Schritte 2 und 3 können gegebenenfalls entfallen, wenn die äußere Orientierung der Messkamera(s) vorab bestimmt wurde und konstant ist.

Mit der heutigen Technologie der digitalen Bildaufnahme und Bildanalyse sowie der Verfügbarkeit zahlreicher optischer Sensoren und Systeme haben sich die Anwendungsmöglichkeiten der Photogrammetrie erheblich erweitert. Besondere Herausforderungen stellen sich dabei hinsichtlich gesteigerter Anforderungen an Automation und Genauigkeit der Messung. Hierbei spielt die Kalibrierung der eingesetzten Sensoren eine entscheidende Rolle. Dies gilt sowohl für den Bereich der Luftbildphotogrammetrie als auch für die Nahbereichsphotogrammetrie. Letztere deckt jedoch ein erheblich größeres Spektrum an Aufnahmesystemen und Anwendungen ab, so dass der Schwerpunkt dieser Arbeit auf Fragen der Kamerakalibrierung für Nahbereichsanwendungen liegt.

Ziel und Motivation dieser Arbeit ist die systematische Aufbereitung der heute üblicherweise eingesetzten Verfahren zur photogrammetrischen Kamerakalibrierung und deren Erweiterungen, die nach dem aktuellen Stand der Forschung zurzeit diskutiert werden. Diese Erweiterungen sind begründet in Kameras mit mangelnder mechanischer Stabilität, speziellen Aufnahmeoptiken (z.B. Überweitwinkel- und Fischaugenobjektive, Varioobjektive, Spiegelsysteme), in den Eigenschaften der verwendeten Bildsensoren (z.B. Abweichungen von der Ebenheit) oder in systembedingten Anforderungen (z.B. Farbkameras, Projektoren, Mehrmedienfälle). Aufbauend auf einer Darstellung bekannter physikalischer, mathematischer und photogrammetrischer Grundlagen werden dabei die Spezial- und Sonderfälle der Kalibrierung näher untersucht und bewertet.

Der Arbeit liegen zahlreiche externe und eigene Erfahrungen und Publikationen zu Fragen der Kamerakalibrierung zugrunde. Für ein vertieftes Verständnis der photogrammetrischen Kamera- und Systemkalibrierung ist es jedoch unerlässlich, die Grundlagen der analytischen Photogrammetrie zu verstehen. Da diese hier nicht wiederholt werden, sei auf einschlägige Literatur und aktuellere Lehrbücher verwiesen, z.B. Atkinson (2001), Mikhail et al. (2001), Luhmann (2003), Kraus (2004), McGlone (2004).

Übersichtsbeiträge zur Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie und Publikationen zu fundamentalen Entwicklungen finden sich u.a. bei Brown (1971), Fraser (1980), Godding (1993), Fryer (1996), Remondino & Fraser (2006).

In jüngerer Zeit werden alternative Ansätze zur Lösung der Kalibrieraufgabe diskutiert, insbesondere im Fachgebiet Computer Vision. Hier werden schnelle lineare Verfahren auf Grundlage der projektiven Geometrie favorisiert, die im Wesentlichen auf der Berechnung geeigneter Transformationsmatrizen basieren. Übersichten dazu geben u.a. Schreer (2005), Förstner & Wrobel (2004), Hartley & Zisserman (2000), Faugeras (1993).

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in fünf Hauptabschnitte. Nach einer Einführung zum Thema widmet sich Kapitel 2 den physikalischen Grundlagen der optischen Abbildung. Ziel ist hier das Verständnis für grundlegende optische Abbildungsgesetze und deren Bezug zur mathematischen Formulierung in der Photogrammetrie. Kapitel 3 beschreibt die wesentlichen Standardmodelle der analytischen Kamerakalibrierung im Nahbereich. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf den im Kapitel 4 dargelegten erweiterten und alternativen Kalibrierverfahren. Kapitel 5 schließlich fasst die Ergebnisse zweier systematischer Untersuchungen zur Wirkungsweise von Modellparametern im Hinblick auf die erreichbare äußere Genauigkeit zusammen. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

1.2 Photogrammetrische Kamerakalibrierung

Mit dem Begriff *Kamerakalibrierung* wird im Folgenden der Schritt bezeichnet, sämtliche Parameter und Funktionen eines Aufnahmesystems zu bestimmen, die für eine hinreichend genaue geometrische Modellierung des optischen und ggf. elektronischen Abbildungsvorganges benötigt werden. In der Photogrammetrie ist es üblich, mit dem Begriff der *inneren Orientierung* die Lage des Projektionszentrums im Bildraum und Abweichungen der realen Aufnahmegeometrie vom idealen Modell der Zentralprojektion einer Lochkamera zu umschreiben. Dagegen wird im Bereich des Computer Vision mit dem Begriff *Kalibrierung* (calibration) häufig die gemeinsame Bestimmung der Parameter der inneren (intrinsic calibration) und der äußeren Orientierung (extrinsic calibration) eines Bildes verstanden. Verfahren zur mechanisch-optischen Kamerakalibrierung und Justierung (Laborkalibrierung) werden in dieser Arbeit nicht diskutiert.

Der oben genannte photogrammetrische Prozess muss erweitert werden, wenn vom klassischen Prinzip der Messkamera abgewichen wird. Unter *Messkamera* (früher: Messkammer) verstehen wir dabei eine photogrammetrische Kamera, deren innere Orientierung oder geometrisches Kameramodell hinreichend genau bestimmt und für einen langen Zeitraum als konstant angesehen werden kann. Jede Kamera kann daher als Messkamera angesehen werden, wenn diese Voraussetzungen für die angestrebte Genauigkeit der Messergebnisse erfüllt werden. Umgekehrt heißt dies jedoch auch, dass ein als Messkamera definiertes Aufnahmesystem neu kalibriert werden muss, wenn höhere Qualitätsanforderungen an das Ergebnis gestellt werden. Ist in diesem Sinne die innere Orientierung also nur teilweise bekannt und ist mindestens ein kamerafestes Bildkoordinatensystem vorhanden, hat man dies in der Vergangenheit als *Teilmesskamera* bezeichnet. Kameras, die weder ein reproduzierbares Bildkoordinatensystem besitzen noch über Qualität und Stabilität einer Messkamera verfügen, werden häufig als Nichtmess- oder *Amateurkamera* bezeichnet (Wester-Ebbinghaus 1989).

a) Wild P31

b) Rollei 6008 metric

c) GSI Inca 3

d) Mamiya DCS 465

Abb. 1.1: Analoge und digitale Mess- und Teilmesskameras

Das Messkammerprinzip galt in der Nahbereichsphotogrammetrie bis in die 1980er Jahre, so dass praktisch ausschließlich Aufnahmesysteme zum Einsatz kamen, die aufgrund ihrer mechanischen und optischen Güte als Messkameras angesehen werden konnten (Beispiel in Abb. 1.1a). Sie wurden durch handelsübliche, um ein Réseau erweiterte analoge Mittelformatkameras abgelöst, die dem Prinzip der Teilmesskameras entsprachen und zu einer deutlichen Kostensenkung der Aufnahmetechnik geführt haben (Beispiel in Abb. 1.1b). Hochstabile Digitalkameras, die weitgehend dem Messkamerakonzept entsprechen, werden für spezielle industrielle Anwendungen (Beispiel in Abb. 1.1c) oder medizinische Anwendungen (Beispiel in Abb. 2.6b) eingesetzt. Am häufigsten kommen heute jedoch Spiegelreflexdigitalkameras zum Einsatz, wie sie für den Consumermarkt angeboten werden. Sie können als Teilmesskameras angesehen werden, da der Bildsensor ein reproduzierbares Bildkoordinatensystem definiert (Beispiel in Abb. 1.1d).

In jüngerer Zeit sind die Begriffe Messkamera, Teilmesskamera und Amateurkamera jedoch weitgehend aus dem wissenschaftlich-technischen Sprachschatz verschwunden. Nach DIN 18716-1 dient eine Messkamera zur Aufnahme von *Messbildern*, die wiederum durch bekannte oder bestimmbare innere Orientierung gekennzeichnet sind.

1.3 Historische Aspekte

Die Anfänge der analytischen photogrammetrischen Kamerakalibrierung reichen zurück bis in die 1950er Jahre. Grundlage dafür waren zum einen die Formulierung der Kollinearitätsgleichungen (siehe Kap. 4.1.1) durch Schmid (1958), daneben aber auch wegweisende Entwicklungen von Brown (Brown 1956, Brown et al. 1964). Die Kollinearitätsgleichungen können als Grundgleichungen der Photogrammetrie bezeichnet werden, auf ihnen basieren praktisch alle wichtigen photogrammetrischen Verfahren. Sie können direkt als (nicht-lineare) Beobachtungsgleichungen im Zuge eines Gauß-Markov-Modells nach kleinsten Quadraten genutzt werden. Die rechte Seite der Gleichungen kann dabei um Terme für die Modellierung von Abbildungsfehlern erweitert werden.

Des Weiteren hat die seit den fünfziger und sechziger Jahren eingesetzte Entwicklung der Rechnertechnologie dazu geführt, dass schon früh komplexe Gleichungssysteme für die Orientierung von Mehrbildverbänden (Modellausgleichung, Streifentriangulation, Bündelausgleichung) gelöst werden konnten. Erste erfolgreiche Implementierungen für Luftbildanwendungen zeigten u.a. Brown (1958), Brown et al. 1964, Ackermann et al. (1970), später Jacobsen (1980) und andere. Da die regelmäßige Bildanordnung und die Verwendung kalibrierter Messkameras bei Luftbildern rechentechnisch günstige Normalgleichungssysteme ergeben, konnte sich die Bündelausgleichung hier früh als Standardverfahren durchsetzen.

Mitte bis Ende der 1970er Jahre wurde die Bündelausgleichung um zusätzliche Parameter für Bildfehler beschreibende Funktionen erweitert (u.a. Bauer & Müller 1972, Kölbl 1975, Brown 1976, Ebner 1976, Grün 1978, Jacobsen 1980). Zusätzliche Kameraparameter sind in der Designmatrix mit allen Beobachtungen verknüpft und führen zu erheblich komplexeren Normalgleichungssystemen. Die zur Lösung erforderliche Rechen- und Speicherleistung stand zu diesem Zeitpunkt erstmals zur Verfügung. Zusätzliche Parameter führten zu einer Genauigkeitssteigerung bei Luftbildverbänden, vor allem aber eröffneten sie die Möglichkeit, vom klassischen Messkameraprinzip abzuweichen.

Für Nahbereichsanwendungen wurden spezielle Bündelausgleichungsprogramme entwickelt, die neben der optimierten Gleichungslösung auch die Option boten, zusätzliche geodätische Beobachtungen und geometrische Bedingungen zu integrieren (Mauelshagen 1977, Wester-Ebbinghaus 1985a, Kruck 1983, Kager 1898, Hinsken 1989). Die Nahbereichsphotogrammetrie profitierte wesentlich von der jetzt vorhandenen Möglichkeit, praktisch beliebige Kameras simultan in der Bündelausgleichung zu kalibrieren. Einzige verbleibende geometrische Bedingung an die Aufnahmekameras ist die Existenz eines kamerafesten und reproduzierbaren Bildkoordinatensystems. Dies wurde mit dem Teilmesskameraprinzip realisiert, bei dem das fehlende Kamerabezugssystem durch Einbau einer Réseauplatte kompensiert wurde. Hierdurch wurde es möglich, mit handelsüblichen Klein- und Mittelformatkameras leistungsfähige und dabei kostengünstige photogrammetrische Aufnahmesysteme zu entwickeln (Wester-Ebbinghaus 1983). Die Anwendung dieses Prinzips auf Großformatkameras (GSI, Rollei, Hasselblad) öffnete den Weg zur hochgenauen Industriephotogrammetrie (Fraser & Brown 1986, Wester-Ebbinghaus 1989, Dold 1997).

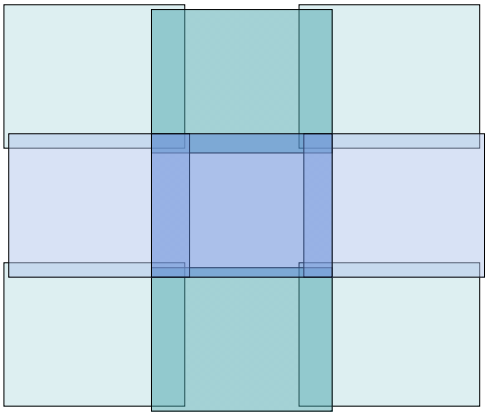
Mit dem Aufkommen digitaler Kameras Mitte der 1980er Jahre wurden vor allem Möglichkeiten zur Automation der gesamten photogrammetrischen Prozesskette eröffnet. Sowohl analoge und digitale Videokameras als auch die seit ca. 1990 verfügbaren digitalen Spiegelreflexkameras (still-video cameras) werden überwiegend als Teilmesskameras betrachtet. Sie können mit denselben mathematischen Ansätzen wie analoge Kameras modelliert werden, solange die geforderte Messgenauigkeit eingehalten wird.

In den vielfältigen Gebieten der digitalen Bildverarbeitung und der Robotik wurden seit Anfang der 1990er Jahre neue Verfahren zur 3D-Auswertung und Kamerakalibrierung entwickelt. In diesen Fachgebieten war lange Zeit die schnelle, vollautomatische Kalibrierung vorrangiges Ziel, so dass häufig auf Korrekturparameter ganz verzichtet wurde oder nur vereinfachte Modellansätze zum Einsatz kamen (z.B. Tsai 1986, Lenz 1987). Die Bestimmung der Parameter der inneren und äußeren Orientierung erfolgte in der Regel getrennt oder in sequentieller Weise.

Erst in jüngerer Zeit wird auch hier das Genauigkeitsproblem stärker in den Fokus genommen und Verfahren zur Optimierung von Mehrbildverbänden nach dem Bündelausgleichungsprinzip eingesetzt (Triggs et al. 1999, Hartley & Zisserman 2000).

Die heute verfügbaren photogrammetrischen Systeme sind ohne analytische Kamerakalibrierung nicht mehr denkbar. So werden die aktuellen, hoch auflösenden digitalen Luftbildkameras (Beispiel in Abb. 1.2) sowohl werkseitig vorkalibriert als auch mathematisch kalibriert, da komplexe Sensoranordnungen (Vexcel UltraCam, ZI DMC, Leica ADS) nicht mehr allein mit vertretbarem Aufwand und Erfolg im Labor kalibriert werden können (Dörstel et al. 2003, Tempelmann et al. 2003, Gülch & Cramer 2004, Hofmann 2005).

a) Vexcel UltraCam X



b) Anordnung der Bildsensoren

Abb. 1.2: Beispiel einer digitalen Luftbildkamera mit mehreren Sensoren (Microsoft Vexcel)

In der Nahbereichsphotogrammetrie hat die Vielfalt photogrammetrischer Lösungen enorm zugenommen. Hoch auflösende Digitalkameras werden standardmäßig für Offline-Anwendungen eingesetzt und haben analoge Kameras auch hinsichtlich Bildqualität und Messgenauigkeit vollständig verdrängt. Der Einsatz handelsüblicher Kameras erfordert bei hohen Genauigkeitsforderungen jedoch eine verfeinerte und erweiterte Kameramodellierung, z.B. zur Kompensation von Sensorfehlern und geometrischen Veränderungen von Bild zu Bild (bildvariante Kalibrierung: Maas 1999a, Tecklenburg & Luhmann 2001). Der zunehmende Einsatz im industriellen und medizinischen Umfeld führt zur Entwicklung neuer Strategien für die Kalibrierung, welche nun einerseits in Echtzeit, andererseits mit extrem hoher Genauigkeit bereitgestellt werden muss.

a) Laserscanner Riegl LMS-Z 360i

b) Laser Tracker Leica LTD mit T-Cam

c) Steinbichler T-Scan mit 3D-Trackingsystem NDI Optotrak

Abb. 1.3: Beispiele hybrider Messsysteme mit integrierten Bildsensoren

Schließlich werden photogrammetrische Systeme zunehmend mit anderen Sensoren zu hybriden Systemlösungen verknüpft. Dazu gehören terrestrische 3D-Laserscanner und Lasertracker mit integrierter Digitalkamera, Panoramakameras, Streifenlichtsysteme mit Projektoreinheit und mehreren Kameras, optisch navigierte Lasertriangulationssysteme oder beliebige andere Kombinationen von Sensoren (Beispiele in Abb. 1.3). Die erzielbaren Messgenauigkeiten sind primär von der Kalibrierung der Einzelkomponenten sowie deren Zusammenspiel im Gesamtsystem abhängig. Hier wird mit dem Begriff *Systemkalibrierung* die Aufgabe umrissen, alle relevanten geometrischen Parameter eines hybriden Systems in einem Zug zu bestimmen.

Die mögliche Komplexität hybrider optischer Messsysteme führt zu der Frage, ob die physikalisch definierte Modellierung der Abbildungsvorgänge der richtige Weg ist. Dieser klassische Weg, wie er auch in Kap. 3.2 "Optische Abbildung" eingeschlagen wird, mündet üblicherweise in einer mathematischen Formulierung von Bildfehler beschreibenden Funktionen, deren Parameter durch einen komplexen Berechnungsvorgang (z.B. Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung) bestimmt werden. Dabei werden die beobachteten Bildpositionen bestmöglich auf die aufgenommenen Objektpunkte abgebildet. Die dabei typischerweise auftretenden Überparametrisierungen und Korrelationen werden häufig vernachlässigt oder bleiben unberücksichtigt, da ihre Interpretation in komplexen optischen Abbildungen naturgemäß schwierig ist. Als Alternative bieten sich daher Verfahren an, die durch Beobachtung eines (engmaschigen) Referenzkörpers für jeden Bildpunkt (Pixel) einen individuellen Korrekturwert ohne implizite physikalische Begründung angeben. In dieser *brute force* Vorgehensweise wird also lediglich ein in Rasterform vorliegendes Korrekturmodell bestimmt. Erste erfolgreiche Ansätze werden dazu in jüngerer Zeit diskutiert und lassen für die zukünftige Entwicklung der Kamerakalibrierung noch ein interessantes Potenzial erwarten (siehe Kap. 5.2).

1.4 Begriffe und Definitionen

1.4.1 Kalibrierung

Nach DIN 1319 wird der Begriff *Kalibrierung* wie folgt definiert:

„Ermitteln des Zusammenhangs zwischen Messwert oder Erwartungswert der Ausgangsgröße und dem zugehörigen wahren oder richtigen Wert der als Eingangsgröße vorliegenden Messgröße für eine betrachtete Messeinrichtung bei vorgegebenen Bedingungen. Bei der Kalibrierung erfolgt kein Eingriff, der das Messgerät verändert.“

Nach dieser Definition erscheint der in der Photogrammetrie übliche Begriff der Kalibrierung zunächst nicht korrekt. In der Regel kann ein Erwartungswert für die Parameter einer Kamera nicht angegeben werden. Nimmt man jedoch an, dass das physikalische Modell einer idealen Lochkamera als Erwartungswert der optischen Abbildung herangezogen werden kann, so beschreiben die in der Kalibrierung berechneten Parameter Abweichungen von diesem Erwartungsmodell.

DIN 1319 führt weiter aus, dass zu einer Kalibrierung gehören:

- Definition des Messprozesses (Umgebungsbedingungen, erforderliche Normale, Vorgehensweise);
- Erstellung eines mathematischen Modells zur Auswertung der Kalibrierung unter Berücksichtigung aller bekannter systematischer Einflüsse;
- Unsicherheitsanalyse mit Hilfe des mathematischen Modells;
- Angabe eines vollständigen Ergebnisses, d. h. Kalibrierwert und Kalibrierunsicherheit;
- Erstellung eines Protokolls, auch Kalibrierschein oder Kalibrierzertifikat genannt;
- der Kalibrierwert für den Kalibriergegenstand wird zur Messwertkorrektur verwendet.

Die Definition des Messprozesses bedeutet für die Photogrammetrie, dass die Aufnahmekonfiguration, das verwendete Objektpunktfeld und die Umgebungsbedingungen (Temperatur) dokumentiert werden. Unterschiedliche Versuchsanordnungen führen in der Regel zu unterschiedlichen Kalibrierergebnissen, insbesondere wenn handgehaltene Aufnahmen getätigt werden oder Anzahl und Verteilung der Aufnahmestandorte variieren.

Die Erstellung eines mathematischen oder geometrischen Modells zur Auswertung der Kalibrierung bedeutet, dass eine nachvollziehbare mathematische Formulierung benötigt wird, die aus den originären Messdaten (hier: Pixel- oder Bildkoordinaten der Messpunkte) die Ableitung von Kalibrierparametern erlaubt. Auch in der Photogrammetrie ist es das Ziel, alle bekannten systematischen Einflüsse zu berücksichtigen. Dies gelingt weitestgehend durch die verwendeten Modelle; systematische Restfehler und Korrelationen zwischen Parametern (innere und äußere Orientierung) sind jedoch trotzdem häufig noch erkennbar. In vielen Fällen ist dies weder vermeidbar noch schädlich, wenn die berechneten Modellparameter nicht von einem Berechnungssystem in ein anderes übertragen werden (das möglicherweise über ein anderes internes Abbildungsmodell verfügt).

Die in DIN 1319 geforderte Unsicherheitsanalyse ist im Falle der analytischen Kamerakalibrierung durch Ausgleichung auf statistischem Wege gegeben. Jedem berechneten Parameter (jeder Unbekannten im Ausgleichungsprozess) wird über die Varianz-Kovarianz-Matrix ein innerer Qualitätswert zugeordnet. Numerische Korrelationen zwischen Parametern lassen sich ebenso ableiten. Ohne die Kontrolle über externe und übergeordnet genaue Referenzmessungen sind die statistisch berechneten Unsicherheitswerte jedoch nur sog. innere Genauigkeiten (Präzision) und spiegeln lediglich wider, mit welcher Präzision die Beobachtungen (Messwerte) durch das implementierte mathematische Modell auf die Unbekannten abgebildet werden.

Die Angabe des Kalibrierergebnisses mit jeweiligen Unsicherheiten in Form geeigneter Protokolle oder Zertifikate ist anwendungsabhängig gegeben. So wird in sensiblen Bereichen (z.B. Flugzeugbau) verlangt, dass jede eingesetzte Kamera bzw. jedes Photogrammetriesystem zertifiziert wird. Darüber hinaus sind hier häufig Forderungen der Rückführbarkeit auf die Einheit Meter zu beachten, wenn die Leistungsfähigkeit eines gesamten photogrammetrischen Systems formell dokumentiert wird.

Schließlich wird festgelegt, dass der Kalibrierwert für den Kalibriergegenstand zur Messwertkorrektur verwendet wird. Hiermit wird deutlich, dass eine Kamera als Messgerät nicht nur in ihren geometrischen Eigenschaften kalibriert wird, sondern dass die ermittelten Werte für die Korrektur der Bilddaten (z.B. Verbesserung der Bildkoordinaten oder Berechnung verzeichnungsfreier Bilder) verwendet werden.

Die nach DIN 1319 für eine Kamerakalibrierung anwendbaren Normen lassen sich sinngemäß auf Systemkalibrierungen übertragen. Dabei zerfließen die Grenzen zwischen der eigentlichen Kalibrierung einzelner Komponenten bzw. des Gesamtsystems und der operationellen Nutzung des Systems.

1.4.2 Justierung und Eichung

Nach DIN 1319-1 wird *Justieren* wie folgt definiert: „Einstellen oder Abgleichen eines Messgerätes, um systematische Messabweichungen so weit zu beseitigen wie es für die vorgesehene Anwendung erforderlich ist. Justierung erfordert einen Eingriff, der das Messgerät bleibend verändert.“

Justierung erfolgt in der photogrammetrischen Kameratechnik nur dort, wo eine analytische Kalibrierung nicht sinnvoll oder unmöglich ist. Beispiele für Justiervorgänge sind mechanische Feineinstellungen an Luftbildkameras, bei denen z.B. die Rechtwinkligkeit zwischen optischer Achse und Bildebene durch Justierung sichergestellt wird. Ein weiteres Beispiel ist die Justierung einer Panoramakamera, bei der die vertikale Drehachse idealerweise durch das Projektionszentrum des Objektivs verläuft. Dies kann durch Verschiebung der Kamera auf einem Schlittensystem oder andere Einstellvorrichtungen realisiert werden (Schneider 2008).

Mit *Eichung* ist stets eine hoheitlich geschützte oder vom Gesetzgeber vorgeschriebene Prüfung eines Messgerätes verbunden. Eichungen werden von Eichämtern vorgenommen und durch entsprechende Kennzeichnungen mit Gültigkeitsdauer belegt. Eichungen kommen in der Photogrammetrie nicht vor. Die Gültigkeit eines Messergebnisses hinsichtlich der Rückführbarkeit auf die Einheit Meter wird durch Annahme- und Überwachungsverfahren geregelt, beispielsweise VDI/VDE 2634.

1.4.3 Qualitätsmaße

Photogrammetrie ist im Wesentlichen ein Verfahren zur Messung von Objektkoordinaten und daraus abgeleiteten Größen. Die Qualität dieser Messergebnisse kann in verschiedener Weise angegeben werden. Die Verwendung der einschlägigen Begriffe wie Messunsicherheit, Genauigkeit, Präzision, Richtigkeit, Auflösung usw. ist häufig unpräzise oder grob falsch (Hennes 2007). Da sich jedoch etliche Sprachweisen in verschiedenen Fachgebieten eingebürgert haben, werden hier kurz die wesentlichen Definitionen und Begriffe zusammengefasst.

Messabweichung

Der Begriff *Messabweichung* bezeichnet nach DIN 1319-1 die Abweichung eines aus Messungen gewonnenen und der Messgröße (physikalische Größe, z.B. Koordinate oder Länge) zugeordneten Wertes vom wahren Wert. Der wahre Wert einer Messgröße ist in der Regel nicht bekannt. In vielen praktischen Anwendungen wird stattdessen der sog. *richtige Wert* verwendet, für den angenommen wird, dass seine Abweichung vom wahren Wert vernachlässigbar klein ist. Die Messabweichung kann als absoluter Fehler (absolute error) aufgefasst werden.

Messunsicherheit

Der Begriff *Messunsicherheit* nach DIN 1319-1 und anderen einschlägigen Publikationen (z.B. GUM) beschreibt den Wertebereich, in dem der wahre Wert einer Messgröße liegt. Die Messunsicherheit ist ein Kennwert, der wie die Messgröße selbst aus Messungen gewonnen wird, d.h. auch äußere Bedingungen und system- und anwendertypische Charakteristiken einschließt. Messgröße und Messunsicherheit sind Schätzwerte. Ein vollständiges Messergebnis liegt also erst vor, wenn der Schätzwert zusammen mit der Messunsicherheit angegeben wird. Schätzwert und Messunsicherheit müssen rückführbar auf eine standardisierte Längeneinheit sein. Messunsicherheit wird nicht zusammen mit der Sicherheitswahrscheinlichkeit angegeben, sondern dient eher als technische Größe, mit der in der Praxis zuverlässig gearbeitet werden kann.

Genauigkeit

Genauigkeit beschreibt den Grad der Übereinstimmung eines Messergebnisses mit einem Normal oder einer akzeptierten Referenz. Sie ist also stets ein Qualitätswert, der erst nach Vergleich mit einem übergeordneten und unabhängigen Referenzwert entsteht. In der Photogrammetrie wird Genauigkeit jedoch auch für Präzision oder Messunsicherheit verwendet, wobei häufig zwischen innerer Genauigkeit und äußerer Genauigkeit unterschieden wird.

Präzision

Unter *Präzision* wird die statistische Abweichung eines Messwertes verstanden, die sich durch Wiederholungsmessungen oder Ausgleichung ergibt. Sie wird in der Regel als Standardabweichung oder RMS-Wert angegeben. Präzision ist identisch mit innerer Genauigkeit und beschreibt im Falle der Wiederholungsgenauigkeit, welche interne Streuung ein angezeigtes Messergebnis besitzt. Im Falle der Ausgleichungsrechnung wird Präzision als Standardabweichung berechnet.

Rauschen

Der Begriff *Rauschen* stammt zunächst aus der Physik und beschreibt ein Signal, dem nur stochastische Eigenschaften zugrunde liegen. Das Rauschen eines Messwertes ist eine zufällige Überlagerung des fehlerfreien Messwertes ohne systematische Anteile. Es wird definiert durch das Signal-Rausch-Verhältnis SNR (signal-to-noise ratio) als Verhältnis eines mittleren Signals zu dessen Standardabweichung.

Dynamik

Mit *Dynamik* wird das Verhältnis des maximalen Signals (Messwertes) zum minimalen Signal (Rauschgrenze) beschrieben. Es kann daher auch als Signal-Rausch-Verhältnis interpretiert werden. In der Optik tritt Dynamik in der Regel als maximaler Kontrastumfang eines Bildes oder Sensors auf. In der hier geführten Diskussion zu Genauigkeitsmaßen kann Dynamik mit der Relativgenauigkeit gleichgesetzt werden, die sich aus dem Quotient zwischen maximaler Objektgröße (z.B. Diagonale des Messvolumens) und Messabweichung ergibt.

Richtiger Wert und wahrer Wert

Richtigkeit oder *richtiger Wert* kennzeichnen einen Referenzwert, der aus praktischen Erfahrungen oder Vorgaben definiert wird und dessen Abweichungen zum (unbekannten) wahren Wert vernachlässigbar klein sind. Als richtiger Wert kommen z.B. übergeordnet genau gemessene Größen oder durch Kalibrierschein belegte Referenzwerte in Frage, die im Rahmen einer bestimmten, für die Anwendung akzeptablen Messunsicherheit quasi als wahre oder fehlerfreie Werte verwendet werden.

Auflösung

Unter *Auflösung* einer Messgröße versteht man den kleinsten anzeigbaren oder speicherbaren Messschritt eines Messsystems, z.B. die Anzahl der Stellen einer Digitalanzeige. Auflösung bezeichnet darüber hinaus die kleinste Änderung einer zu messenden Größe, die im Messsignal eine signifikante, also über einer Rauschschwelle liegende Änderung erzeugt. Das in der Optik und der Photogrammetrie definierte *Auflösungsvermögen* bezeichnet dagegen die Fähigkeit eines (optischen) Systems, eine Grenzfrequenz noch mit hinreichendem Kontrast oder Modulation zu übertragen.

Abb. 1.4 illustriert den Zusammenhang zwischen den oben definierten Größen richtiger Wert, Auflösung, Präzision und Genauigkeit in Anlehnung an Hennes (2007). Die gemessenen oder angezeigten Werte streuen im Rahmen ihrer Präzision oder Wiederholgenauigkeit, weichen jedoch vom richtigen Wert in einem möglicherweise größeren Maß ab (Genauigkeit).

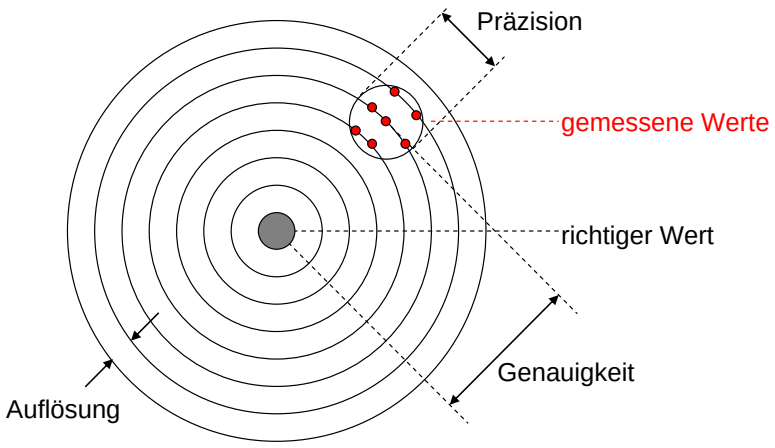


Abb. 1.4: Auflösung, Präzision und Genauigkeit (nach Hennes 2007)

Die in Geodäsie und Ingenieurvermessung üblichen Qualitätsmaße und Begriffe werden in Möser et al. (2000) ausführlich dargestellt. Abb. 1.5 zeigt den Zusammenhang zwischen dem wahren Wert $\tilde{X}$, dem Erwartungswert μ_x, dem Mittelwert bzw. ausgeglichenen Messergebnis $\hat{x}$ und einer einzelnen Beobachtung x_i. Wahrer Wert und Erwartungswert können wegen systematischer Abweichungen Δ_x voneinander abweichen. Die wahre Abweichung η_i setzt sich aus dem systematischen Anteil Δ_x und dem zufälligen Anteil ε_i zusammen.

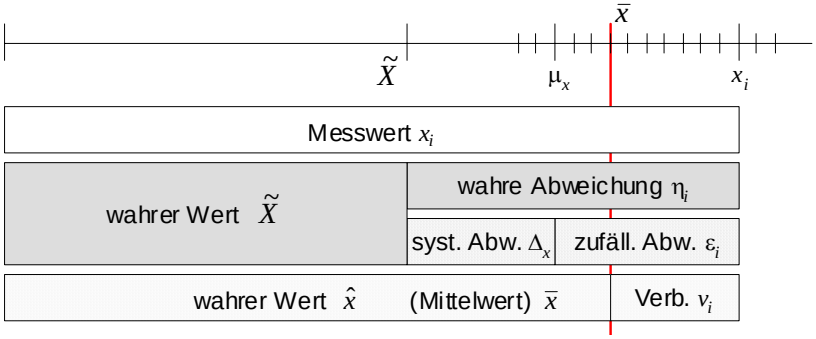


Abb. 1.5: Wahre, zufällige und systematische Abweichungen und Verbesserung (nach Möser et al. 2000)

Da wahrer Wert und Erwartungswert bei endlich vielen Messungen unbekannt sind, basiert die Beurteilung der Genauigkeit einer Messgröße auf den Verbesserungen v_i der vorliegenden Messwerte.

1.4.4 Kamerakonstante

An dieser Stelle erfolgt eine kurze Diskussion des klassischen photogrammetrischen Begriffes der *Kamerakonstante*.[1] Der Begriff *Kammerkonstante* wurde vermutlich um 1940 herum etabliert und findet sich erstmals bei Schwidefsky (1942). Bis dahin wurden recht unpräzise die Begriffe Bildweite und Brennweite verwendet (Koppe 1889, Meydenbauer 1912, Gast 1930, Finsterwalder 1936). Mit Kammerkonstante wurde seitdem der Wert für die Bildweite verstanden, der nach einer Justierung zu minimaler Verzeichnung im Bild führt und für photogrammetrische Berechnungen verwendet werden muss.

Der Begriff Kammerkonstante schließt mit dem Wort *Kammer* die Annahme ein, dass eine photogrammetrische Aufnahmekamera dem Messkammer-Prinzip entspricht. Konstruktiv bedeutete dies, dass der Kamerakörper und das Objektiv eine mechanisch feste Einheit (Kammer) bilden, die unverändert für einen langen Zeitraum *konstant* blieb. Fokussierung und Objektivwechsel wurden damit per se ausgeschlossen. Weiterhin wird eine ebene Bildfläche vorausgesetzt, so dass alle Bildpunkte im dreidimensionalen Bildraum denselben Wert in z'-Richtung, nämlich den der Kammerkonstante, besitzen.

Seit etwa den 1980er Jahren wurde statt Kammerkonstante zunehmend der Begriff Kamerakonstante verwendet. Dies liegt vermutlich an der zunehmenden praktischen Verwendung normaler „Kameras“, möglicherweise aber auch an einer Vereinheitlichung internationaler Sprachgebräuche (z.B. im Englischen: *camera constant*).

In vielen Lehrbüchern und Publikationen wird die Kamerakonstante mit dem Formelzeichen c_k abgekürzt. DIN 18716-1 „Photogrammetrie und Fernerkundung – Teil1: Grundbegriffe und besondere Begriffe der photogrammetrischen Aufnahme“ führt zunächst den wenig gebräuchlichen Begriff der *Bildkonstante c* ein. Im Weiteren wird dann die *Kamerakonstante der Messkamera* c_a und die *Bildkonstante des Messbildes* c_i definiert. Hier liegt also die Annahme zu Grunde, dass eine Messkamera eine eigene, kamerafeste Kamerakonstante besitzt, die z.B.

[1] Die photogrammetrische Definition der Kamerakonstanten erfolgt in Kap. 2.3.2

durch Laborkalibrierung im Werk festgelegt wird. Das mit einer Kamera aufgenommene Bild kann jedoch eine eigene, von der Kamerakonstante abweichende Bildkonstante haben, die z.B. durch analytische Berechnung durch Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung bestimmt worden ist.

Das klassische Messkameraprinzip wird heute nur noch bei analogen Luftbildkameras umgesetzt. Neue digitale Luftbildaufnahmesysteme besitzen gegenüber herkömmlichen Reihenmesskameras eine völlig andere Sensortechnologie, die zum einen kaum noch einen messkameraartigen Kameraaufbau gestatten und zum anderen ohne rechnerische Kalibrierung nicht einsatzfähig sind.

Die zahllosen Kameratypen, die in der Nahbereichsphotogrammetrie eingesetzt werden, sind nur in Ausnahmefällen speziell für photogrammetrische Zwecke konstruiert worden. Beispiele für diese Spezialfälle sind die in Abb. 1.1a und Abb. 1.1c dargestellten Kameras. In allen anderen Fällen kommen handelsübliche Kameras und Objektive zum Einsatz, deren mechanische und optische Qualität über alle Güteklassen reicht. Eine konstante innere Orientierung oder Kalibrierung kann in vielen Fällen nur noch für einen sehr begrenzten Zeitraum erwartet werden, häufig ändert sie sich aufgrund äußerer Einflüsse bereits von Bild zu Bild (Shortis et al. 1998, Maas 1999a, Tecklenburg & Luhmann 2001).

Es ist also zu hinterfragen, ob der Begriff Kamerakonstante noch zeitgemäß ist. In Gast (Gast 1930, S. 174) wird der Abstand zwischen Bildhauptpunkt und Projektionszentrum als „konstanter Bildabstand der inneren Orientierung“ bezeichnet. Im Englischen beschreibt der Begriff *principal distance* treffend dasselbe Maß, auch in guter Korrespondenz zum Begriff *principal point* für Bildhauptpunkt. Buchholtz (1960) definiert *Bildkonstante c* für den von der Kamerakonstante abweichenden Wert eines skalierten Messbildes oder Papierabzuges.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Abstand zwischen bildseitigem Projektionszentrum und Bildhauptpunkt heute treffender mit *Bilddistanz* oder *Bildabstand* bezeichnet werden müsste. Für verallgemeinerte analytische Darstellungen ist es ratsam, das Bildkoordinatentripel statt mit

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} x' - x'_0 \\ y' - y'_0 \\ -c \end{bmatrix} \tag{1.1}$$

konsequent durch

$$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} x' - x'_0 \\ y' - y'_0 \\ z' \end{bmatrix} \tag{1.2}$$

zu ersetzen, wie es in einigen Lehrbüchern bereits geschieht (Albertz & Wiggenhagen 2009, Luhmann et al. 2006). Die Verwendung einer Bilddistanz z' erlaubt zudem, für jeden Bildpunkt einer (auch nicht ebenen) Bildfläche einen in Aufnahmerichtung wirkenden Kameraparameter einzuführen.

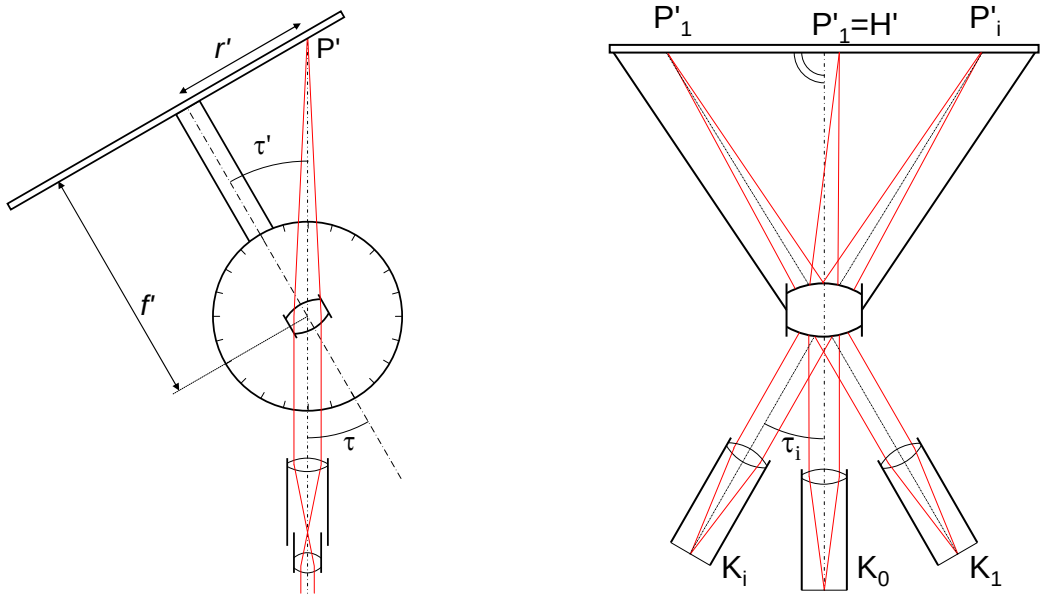
Unabhängig davon wird es im normalen Sprachgebrauch der Photogrammetrie, und auch in dieser Arbeit, bei der Verwendung des Begriffes Kamerakonstante bleiben.

1.4.5 Photogrammetrische Begriffe der Kalibrierung

Laborkalibrierung

Unter *Laborkalibrierung* wird allgemein eine werksseitig vom Kamerahersteller durchgeführte Kamerakalibrierung verstanden, bei der ein Teil oder alle relevanten Parameter durch Messung mit geeigneten übergeordnet genauen Vorrichtungen bestimmt werden. Die klassische Laborkalibrierung für analoge Reihenmesskameras geschieht durch Goniometer oder Kollimatoreinrichtungen (Abb. 1.6, siehe z.B. Schwidefsky & Ackermann 1976, Meier 1976, Hakkarainen 1985, Hofmann 2005). Der wesentliche Unterschied zur analytischen Kalibrierung ist die direkte Bestimmung der Verzeichnung (radiale und tangentiale Anteile) mit Hilfe von Richtungsmessungen durch das Kameraobjektiv hindurch. Laborkalibrierungen sind nur für hinreichend stabile Aufnahmesysteme sinnvoll, die dem in Kap. 1.2 definierten Prinzip der Messkamera entsprechen.

Eine moderne Variante der Laborkalibrierung ist die sog. Sichtstrahlkalibrierung (Schulte et al. 2006). Auch hier wird ein System durch einen stationären Laboraufbau kalibriert, bei dem für jeden Bildpunkt (Pixel) eines Aufnahmesystems eine Richtungsbestimmung des Sichtstrahls erfolgt (siehe Kap. 5.2.2).

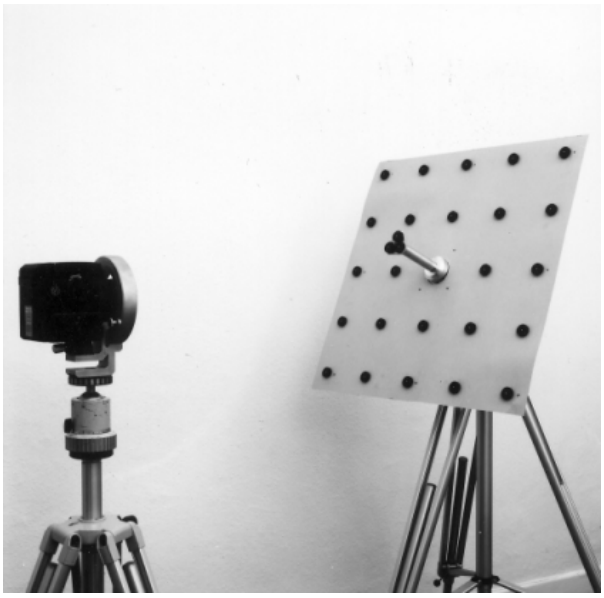


a) Goniometer b) Kollimatoren

Abb. 1.6: Messanordnungen für Laborkalibrierungen (nach Schwidefsky & Ackermann 1976)

Testfeldkalibrierung

Bei der Testfeldkalibrierung wird ein geeignet signalisiertes Objektpunktfeld mit bekannten Koordinaten oder Strecken von mehreren Standpunkten aus formatfüllend und mit ausreichender Strahlenschnittgeometrie aufgenommen. Testfelder können transportabel (Abb. 1.7a) oder fest an einem Objekt (z.B. Hauswand, Abb. 1.7b) angebracht sein.



a) Transportables Testfeld

b) Testfeld an einer Hauswand

Abb. 1.7: Beispiele photogrammetrischer Testfelder

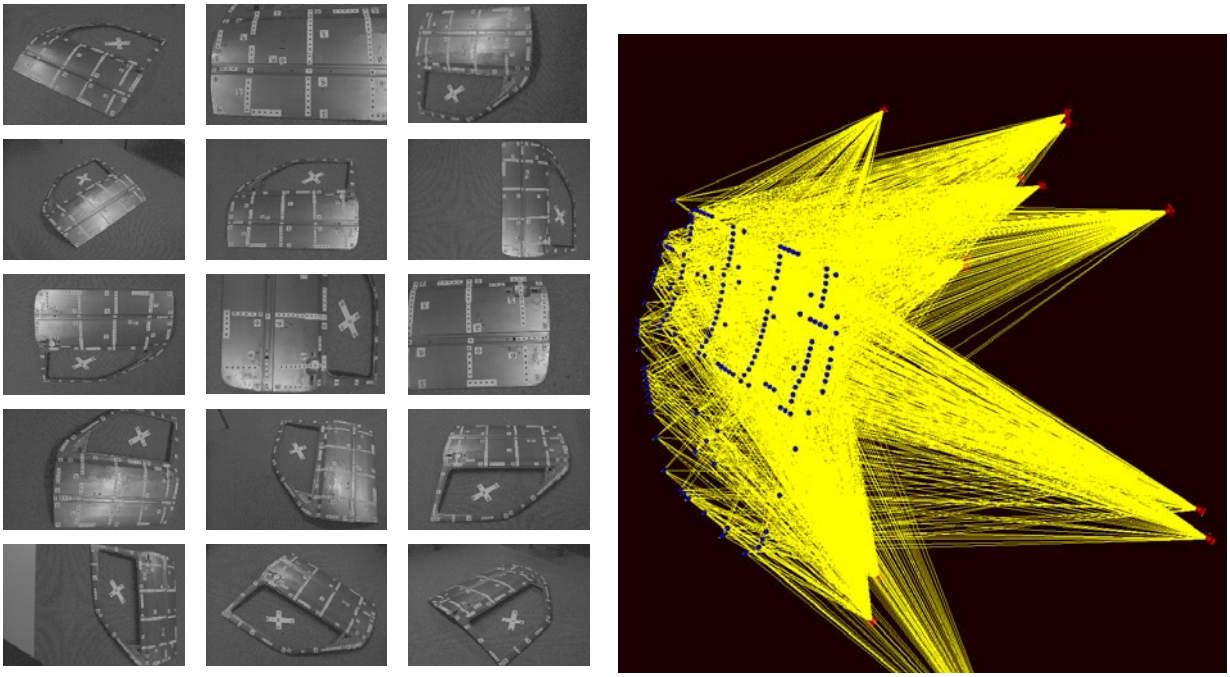
Die Parameter des Kameramodells werden im Rahmen einer Bündelausgleichung mitgeschätzt. Dabei werden üblicherweise auch die Parameter der äußeren Orientierung sowie die 3D-Objektkoordinaten berechnet. Testfelder können wahlweise Passpunkte und/oder unbekannte Punkte besitzen. Ebenso können kalibrierte Längenmaßstäbe mit aufgenommen werden, die zur Skalierung der Strahlenbündel genutzt werden. Kameras lassen sich jedoch auch völlig ohne Maßstabsinformation kalibrieren (siehe Kap. 4.3.2.1).

Bei der Plumbline-Kalibrierung wird ein Testfeld mit mehreren in einer Geraden (z.B. an Loten) befindlichen Zielmarken verwendet. Ziel ist die Bestimmung der Verzeichnungsparameter ohne gleichzeitige Bestimmung von Kamerakonstante, Hauptpunktlage und äußerer Orientierung. Die Berechnung erfolgt durch Minimierung der Abstände verzeichneter Bildpunkte zu korrespondierenden Bildgeraden (Fryer 1989).

Simultankalibrierung, Feldkalibrierung, On-the-job-Kalibrierung

Üblicherweise werden Testfeldkalibrierungen dann durchgeführt, wenn keine Simultankalibrierung im Zuge der Objektaufnahme möglich ist und eine Genauigkeitsuntersuchung einer Kamera vorgenommen werden soll (siehe Kap. 4.3.2). Es ist daher darauf zu achten, dass die geometrische Aufnahmekonfiguration der Testfeldkalibrierung weitgehend der späteren Objektaufnahme entspricht. Veränderungen an der Kamera zwischen Testfeldaufnahme und Objekterfassung sollten in jedem Fall unterbleiben.

Zur Kamerakalibrierung kann das o.g. Testfeld durch das aktuelle Messobjekt ersetzt werden, wenn dies mit einer hinreichenden Anzahl und Verteilung von Aufnahmen erfasst wird (Abb. 1.8). Wird die Aufnahmekamera also simultan mit der Objektpunktbestimmung kalibriert, wird dies häufig mit Simultankalibrierung oder On-the-job-Kalibrierung bezeichnet. Der früher verwendete Begriff der Feldkalibrierung ist heute kaum mehr gebräuchlich.



a) Mehrbildaufnahme eines Messobjektes b) Strahlenbündel im Raum

Abb. 1.8: Beispiel einer Objektmessung mit Simultankalibrierung

Selbstkalibrierung

Unter Selbstkalibrierung wird das Verfahren bezeichnet, eine Kamera ausschließlich mit gemessenen Bildkoordinaten als Beobachtungen in einer Bündelausgleichung zu kalibrieren (Wester-Ebbinghaus 1985b). Es wird hierbei bewusst auf Passpunkte oder andere geometrische Bedingungen im Objektraum verzichtet, um ausschließlich aus der Geometrie der Strahlenbündel die Aufnahmekamera zu modellieren.

Systemkalibrierung

Mit Systemkalibrierung wird der Prozess beschrieben, alle relevanten Sensoren und Komponenten in einem photogrammetrischen System zu kalibrieren. Systemkalibrierungen können komplexe Vorgänge sein, da z.B. fest montierte Sensoren nicht ohne Weiteres eine flexible Aufnahmeanordnung gestatten, wie es bei Testfeld- oder Simultankalibrierungen erforderlich ist. Beispiele dazu sind Laserscanner mit integrierter Kamera, fest eingerichtete Multikamera-Messzellen oder andere hybride Systeme.

1.5 Zum Aufbau dieser Arbeit

Nach der Einführung in die Thematik gliedert sich die vorliegende Arbeit in folgende Hauptabschnitte:

Kap. 2 befasst sich mit grundlegenden Überlegungen zu Systemaspekten der Kamerakalibrierung. Hier werden zunächst die unterschiedlichen Aufnahmekonzepte betrachtet, die je nach Datenfluss in Online- und Offline-Prozesse unterteilt werden. Anwendungs- und systembezogen ergeben sich grundlegende Anforderungen an die Kalibrierung der beteiligten Kameras. Mit der Konzeption eines allgemeinen Modells zur Systemkalibrierung wird dieser Abschnitt abgeschlossen.

Kap. 3 behandelt zunächst die wesentlichen physikalischen Grundlagen der optischen und photogrammetrischen Abbildung. Nach einer allgemein gehaltenen Darstellung der wichtigen Beziehungen der optischen Wellenaus-

breitung werden die Grundzüge der optischen Konstruktion, der Definition des Projektionszentrums und der wichtigen Abbildungsfehler erläutert. Der Übergang zur photogrammetrischen Betrachtungsweise der Bildentstehung und seiner mathematischen Formulierung schließt dieses Kapitel.

Kap. 4 befasst sich mit den Standardmodellen und Verfahren zur geometrischen Kameramodellierung. Ausgehend von der mathematischen Beschreibung der räumlichen Zentralprojektion werden die typischen Bildfehler beschreibenden Funktionen erläutert, die in der Nahbereichsphotogrammetrie verwendet werden. Es folgen einige grundlegende Betrachtungen von Aufnahmekonfigurationen und Strategien zur Kalibrierung, die hier jedoch nur zum Gesamtverständnis der Aufgabe beitragen sollen und daher nur kurz behandelt werden.

Im Kap. 5 folgt mit einer Abhandlung erweiterter Verfahren zur Kameramodellierung der eigentliche Schwerpunkt dieser Arbeit. Hier werden zunächst brechungsabhängige Ansätze betrachtet, die eine verfeinerte Modellierung des Strahlverlaufs in einem Aufnahmesystem oder durch mehrere Medien erlauben. Lokal wirkende Sensordeformationen und bildvariante Korrekturmodelle werden im Anschluss diskutiert. Besondere Objektivformen und Aufnahmesysteme mit alternativen Strahlengängen beschließen diesen Abschnitt.

Im Kap. 6 werden einige exemplarische Versuche zur Kameramodellierung anhand von Testfeldaufnahmen vorgestellt und analysiert. Ziel ist hier die systematische Hinzufügung von erweiterten Kameramodellen und die Untersuchung der jeweiligen Auswirkungen auf die erreichbare Messgenauigkeit im Objektraum. Dazu werden zwei umfangreiche Aufnahmeserien hinsichtlich der jeweils erreichten Genauigkeit untersucht und bewertet.

Die Arbeit schließt in Kap. 7 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.

2 Systemaspekte

2.1 Aufnahmekonzepte

Für einen erweiterten photogrammetrischen Prozess nach Kap. 1.1 muss zwischen Fällen unterschieden werden, bei denen das Messergebnis erst im Nachgang zur Aufnahme vor Ort bereitgestellt wird (Offline-Photogrammetrie) und bei denen eine unmittelbare Auswertung der Bilder bis hin zur 3D-Information erfolgt (Online-Photogrammetrie).

Offline-Verfahren finden sich bei praktisch allen Anwendungen der Luftbildphotogrammetrie, da dort üblicherweise Bildaufnahme und Bildauswertung zeitlich und räumlich voneinander getrennt verlaufen. Erste Konzepte zur Online-Verarbeitung digital erfasster Luftbilder zeigt Mostafa (2003), bei denen es um die direkte Erfassung der Geländetopographie (Digitales Gelände- oder Oberflächenmodell) durch Verfahren des Laserscannings in Kombination mit der direkt georeferenzierten Bildaufnahme geht, so dass unmittelbar oder zeitnah zur Bilderfassung digitale Orthophotos berechnet werden können. Eine direkte Kopplung an einen übergeordneten Auswerteprozess gibt es zunächst nicht, wenn man von Möglichkeiten der bildgestützten Flugnavigation absieht, z.B. beim Anflug auf Landebahnen.

In der Nahbereichsphotogrammetrie ist dagegen eine deutliche größere Bandbreite von Anwendungen und Systemen zu verzeichnen. Unter den zahlreichen Varianten möglicher Systemkonfigurationen und anwendungsbezogener Randbedingungen lassen sich die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Hauptvarianten unterscheiden:

- Offline-Verfahren mit vorkalibrierter Kamera
- Offline-Verfahren mit unkalibrierter Kamera
- Online-Verfahren mit vorkalibrierter Kamera
- Online-Verfahren mit unkalibrierter Kamera

2.1.1 Offline-Verfahren mit vorkalibrierter Kamera

Im Offline-Verfahren mit vorkalibrierter Kamera lassen die Aufnahmesituation oder ggf. die verfügbare Auswertesoftware nicht zu, dass eine oder mehrere eingesetzte Kameras simultan mit der Objektrekonstruktion kalibriert werden. Beispielhaft sind dies Aufnahmekonfigurationen, in denen mit minimaler Bildzahl (z.B. zwei) ein Objekt aus mehr oder weniger einer Blickrichtung erfasst wird (Abb. 2.1). In der Praxis findet man diese Situationen häufig z.B. bei der Aufnahme von Verkehrsunfällen (Abb. 2.2) oder in der Architekturphotogrammetrie. Idealerweise ist die eingesetzte Kamera so stabil, dass eine mehr oder weniger lang zurückliegende Kalibrierung für den Zeitpunkt der Bildaufnahme im Rahmen der gewünschten Genauigkeit noch gültig ist.

Der Aufnahme- und Auswerteprozess gliedert sich somit in die Schritte:

1. Vorabkalibrierung der Aufnahmekamera
2. Aufnahme des Objektes mit der kalibrierten Kamera
3. Bildmessung (Pass- und Verknüpfungspunkte)
4. Orientierung der aufgenommenen Bilder
5. 2D- oder 3D-Objektrekonstruktion

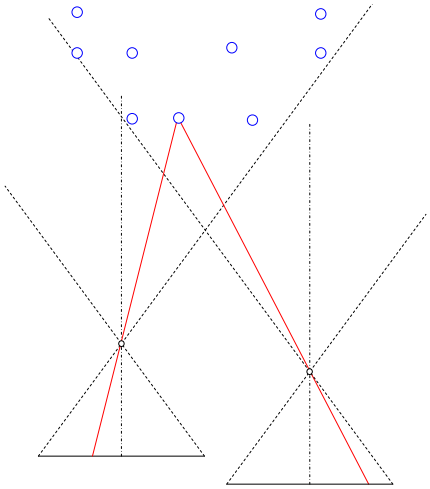


Abb. 2.1: Aufnahmekonfiguration mit geringer Bildanzahl

Abb. 2.2: Beispiel einer geometrisch eingeschränkten Aufnahmesituation (Photometrix)

Die Vorabkalibrierung erfolgt in der Regel mit Hilfe eines geeigneten Testfeldes, das über gut messbare signalisierte Punkte verfügt. Die Kamera muss in der Einstellung kalibriert werden, wie sie auch für die spätere Objektaufnahme verwendet wird. Dies gilt insbesondere für die eingestellte Fokussierung, die zwischen Kalibrierung und Objektaufnahme unverändert bleiben sollte. Fehler der Kamerakalibrierung fließen unmittelbar in die photogrammetrische Objektauswertung ein und können später kaum noch korrigiert werden.

2.1.2 Offline-Verfahren mit unkalibrierter Kamera

Sind keine oder nur veraltete Kalibrierdaten der Kamera verfügbar, oder reicht die Qualität der Vorkalibrierung für die zu erzielende Messgenauigkeit nicht aus, muss die Kamera simultan im Auswerteprozess kalibriert werden. Dies erfordert bestimmte Voraussetzungen an die Anzahl und Verteilung der aufgenommenen Bilder und die Verfügbarkeit von Referenzinformationen im Objektraum (Abb. 2.3, Abb. 2.4). Typischerweise findet man diese Aufnahmesituationen vor bei industriellen Anwendungen, z.B. der allseitigen Erfassung von Produktionsvorrichtungen, bei denen die gestellten Genauigkeitsforderungen in der Regel eine simultane (Nach-)Kalibrierung erfordern.

Der photogrammetrische Prozess unterteilt sich somit in die Schritte:

1. Aufnahme des Objektes mit der unkalibrierten Kamera
2. Bildmessung (Pass- und Verknüpfungspunkte)
3. Kalibrierung, Orientierung und 3D-Objektrekonstruktion

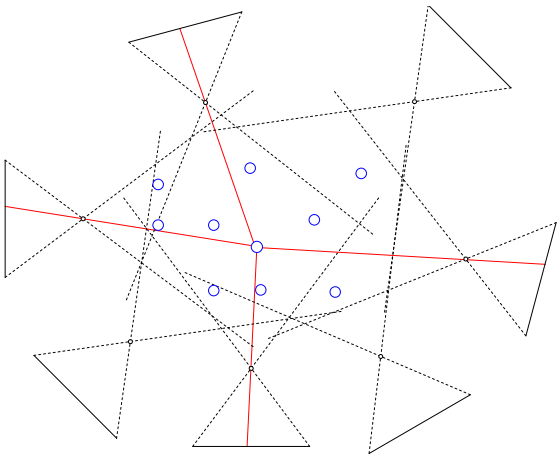


Abb. 2.3: Aufnahmekonfiguration mit höherer Bildanzahl

Abb. 2.4: Beispiel einer Rundum-Objekterfassung durch Offline-Photogrammetrie

Kalibrierung, Orientierung und 3D-Punktbestimmung erfolgen simultan, in der Regel durch Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung. Da hierbei überwiegend mit den gemessenen Bildkoordinaten von Objektpunkten gerechnet wird, erzeugt die Simultankalibrierung ein optimales geometrisches Modell der Aufnahmesituation, das im Sinne kleinster Quadrate zu minimalen Restklaffungen an den gesuchten Objektpunkten führt. Dabei spielt es zunächst keine Rolle, wie dieses Modell physikalisch und mathematisch definiert ist, solange die gewünschten Zielgrößen (i.d.R. die 3D-Objektkoordinaten) hinreichend genau abgeleitet werden. Die Aufnahme eines Mehrbildverbandes und die Auswertung über selbstkalibrierende Bündelausgleichung gilt heute als genauestes und leistungsfähigstes photogrammetrisches Messverfahren (z.B. Godding 1993, Atkinson 1996, Luhmann 2003, Remondino & Fraser 2006, Godding & Luhmann 2006).

2.1.3 Online-Verfahren mit vorkalibrierter Kamera

Photogrammetrische Online-Messverfahren werden dort eingesetzt, wo in geschlossenen Regelkreisen direkt die photogrammetrisch gewonnenen Objektinformationen in einen übergeordneten Prozess einfließen. Typische Beispiele dafür sind Mehrbildmesssysteme für die industrielle Fertigungskontrolle, Stereonavigationssysteme für die computergestützte Chirurgie oder Systeme zur Verfolgung (tracking) von Objekten (Abb. 2.5). In der Regel sind die Kameras hier fest zueinander angebracht. Weder Aufnahmekonfiguration, Objektinformationen noch umgebungsbedingte Einschränkungen lassen eine simultane Kamerakalibrierung zu. Üblicherweise müssen innere und äußere Orientierungsparameter vor der eigentlichen Messung bestimmt werden.

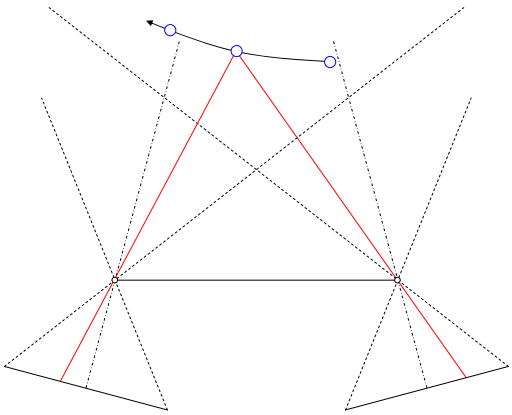


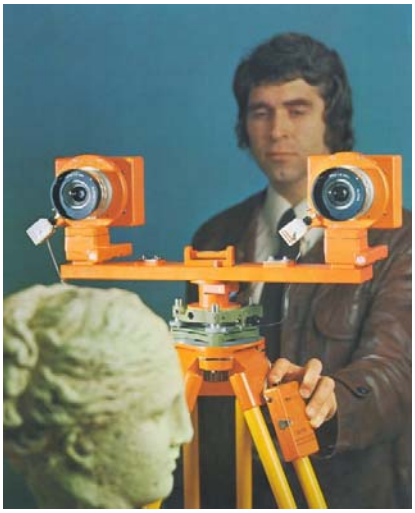
Abb. 2.5: Onlinekonfiguration mit zwei synchronen Kameras

Der schematische Ablauf im photogrammetrischen Prozess sieht somit wie folgt aus:

1. Kalibrierung und Orientierung der eingesetzten Kameras
2. Bildmessung (Pass- und Verknüpfungspunkte)
3. 2D- oder 3D-Objektrekonstruktion

Die Kalibrierung und Orientierung der eingesetzten Kameras erfolgt üblicherweise durch Testfeldkalibrierung. Das Testfeld kann ein starrer Körper oder ein im Raum bewegtes Referenzobjekt, z.B. eine bekannte Längenverkörperung sein. Systeme mit fest in einem mechanischen Verbund montierten Kameras lassen sich je nach geometrischer Güte der Aufnahmesysteme und der Kameramontage analog zum Messkameraprinzip behandeln.

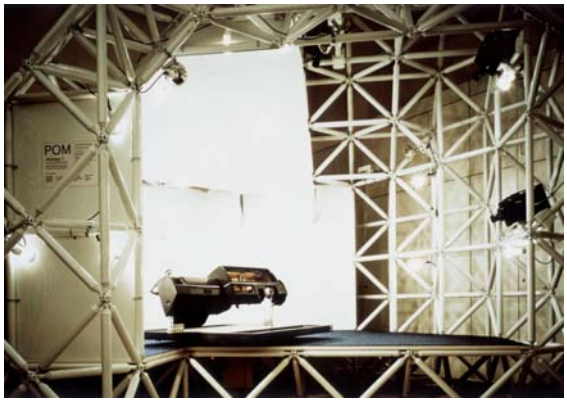
Typische Vertreter dieser Klasse sind Stereoaufnahmesysteme, die erstmals in den 1950er Jahren erfolgreich auf den Markt kamen (Abb. 2.6a) und mit heutigen digitalen Stereosystemen für die medizinische Navigation vergleichbare Nachfolger haben. Das Stereosystem CamBar (AXIOS 3D Services, Abb. 2.6b) ist ein Beispiel für ein photogrammetrisches Aufnahmesystem, dessen Einzelkomponenten wie Objektiv (Linsen, Linseneinfassungen, Blende), Bildsensor (mit Abdeckglas, Filter, Mikrolinsen) und Gehäuse (mit Objektivanschluss, Sensorhalterung, mechanischer Verbindung zur Aufnahmeplattform) jede für sich sowie im Zusammenspiel optimiert werden. Die innere und relative Orientierung der beiden Kameras bleibt selbst nach starker mechanischer Erschütterung, unterschiedlichsten Umgebungstemperaturen und elektromagnetischer Einstrahlung über mehrere Jahre konstant im Bereich von ca. 0.5µm im Bildraum.



a) Analoge Stereomesskamera Wild

b) Digitale Stereomesskamera AXIOS 3D CamBar

Abb. 2.6: Analoges und digitales Stereoaufnahmesystem



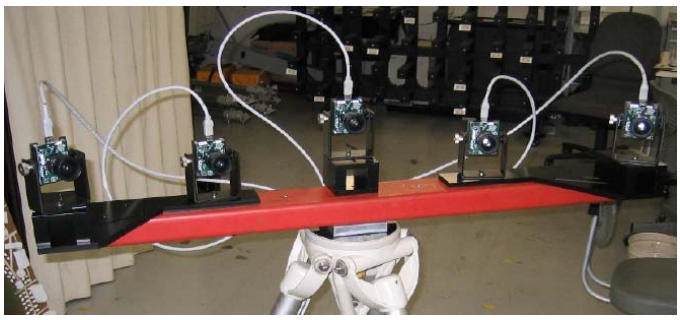
a) Messzelle Leica POM

b) Rohrleitungsprüfsystem AICON TubeInspect

Abb. 2.7: Beispiele stationärer Mehrbildmesssysteme

Mobile Online-Systeme mit mehr als zwei Kameras treten vereinzelt in speziellen Anwendungen auf (z.B. AICON TraceCam). Sie sind häufig mechanisch weniger stabil und erfordern daher eine zur Objektmessung zeitnahe Kalibrierung. Stationäre Online-Systeme können durchaus aus sehr vielen Kameras bestehen, die z.B. innerhalb einer Messzelle angeordnet sind. Beispiele dazu sind Mehrkamerasysteme wie Leica POM (Luhmann & Godding 1992, Abb. 2.7a) oder AICON TubeInspect (Bösemann 1996, Abb. 2.7b). Während das POM noch über mechanisch hochgenaue Komponenten verfügte, werden Systeme wie TubeInspect ständig durch Referenzmessungen kontrolliert und ggf. nachorientiert.

Verbreitet sind Online-Photogrammetriesysteme auch für die Verfolgung von Objektpunkten für Anwendungen in der Bewegungsanalyse (d'Appuzo 2003, Abb. 2.8), der Maschinensteuerung (Berndt & Tutsch 2003) oder des Fahrzeugsicherheitsversuches (Crashtest) (Raguse & Luhmann 2006). Die Erfassung menschlicher Bewegungen ist z.B. für medizinische, ergonomische oder filmtechnische Anwendungen von Interesse. Hier werden häufig mobile Kameras aufgestellt und mit Hilfe geeigneter Testkörper vor Ort kalibriert und orientiert. Eine geeignete Methode ist die Beobachtung eines im Raum bewegten Maßstabes mit bekannter Länge. Dabei wird jede Maßstabsmessung als zusätzliche Beobachtungsgleichung in die Bündelausgleichung eingeführt. (Maas 1999b, siehe Kap. 4.3.2.2).



a) Hometrica

b) Vicon

Abb. 2.8: Mehrkamerasysteme zur räumlichen Bewegungsanalyse

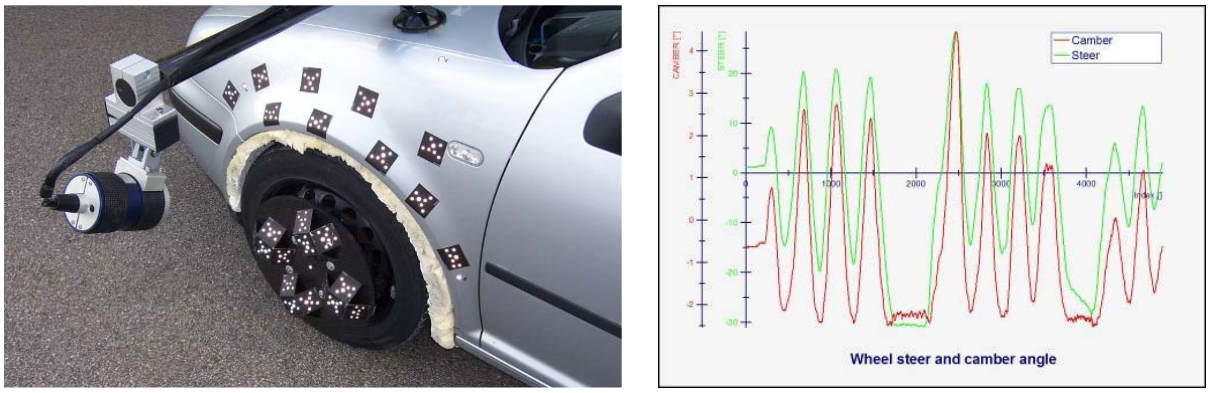
2.1.4 Online-Verfahren mit unkalibrierter Kamera

Die Kombination von Online-Verfahren mit unkalibrierter Kamera macht in messtechnischen Anwendungen nur dann Sinn, wenn durch ständige Verfügbarkeit hinreichend vieler Referenzdaten im Objektraum die fehlende oder sich ständig verändernde innere Orientierung einer oder mehrerer Kameras bestimmt werden kann. Denkbare Szenarien dazu sind Ein- oder Mehrkamerasysteme zur Beobachtung dynamischer Prozesse, die aufgrund äußerer Einwirkungen ständigen geometrischen Änderungen unterliegen.

Der schematische Ablauf im photogrammetrischen Prozess sieht somit wie folgt aus:

1. Bildmessung (Pass- und Verknüpfungspunkte)
2. Kalibrierung und Orientierung der eingesetzten Kameras
3. 2D- oder 3D-Objektrekonstruktion

Abb. 2.9 zeigt ein Messsystem für die Erfassung der sechs Freiheitsgrade (6 DOF) eines Fahrzeugrades während der Fahrt. Die Kamera misst die signalisierten Punkte des Rades und der umgebenden Karosserie in Echtzeit mit bis zu 500 Hz (Wiora et al. 2004). Unter der Annahme, dass die Referenzpunkte auf der Karosserie während des Versuchs unverändert bleiben, dienen diese als Passpunkte für einen erweiterten räumlichen Rückwärtsschnitt, in dem auch Kamerakonstante und Bildhauptpunkt berechnet werden (Kap. 4.3.1.2). Die Messpunkte auf dem Rad werden ebenfalls als konstant in einem lokalen Koordinatensystem gegebenen Passpunkte aufgefasst, so dass die Kamera auch über diesem Punktfeld durch Rückwärtsschnitt orientiert und kalibriert werden kann. Aus der Transformation der beiden äußeren Orientierungen lassen sich die relativen sechs Freiheitsgrade der Bewegung des Rades in Bezug zum Referenzsystem berechnen (Luhmann 2009). Abb. 2.9b zeigt die während der Fahrt des PKW aufgezeichneten Bewegungsparameter.



a) Kamera, Ojekt (Rad) und Referenzkörper (Karosserie) b) Ausgewählte Bewegungsparameter

Abb. 2.9: Einkamerasystem zur hochdynamischen Erfassung von 6DOF-Parametern (AICON)

Die innere Orientierung der Kamera kann sich beim oben dargestellten Beispiel prinzipiell von Bildaufnahme zu Bildaufnahme ändern, sofern sich die Parameter der inneren Orientierung durch die Methode des erweiterten Rückwärtsschnittes oder der projektiven Geometrie (siehe Kap. 4.3.1.1) erfassen lassen. Die Verzeichnungsparameter des Objektivs werden dabei üblicherweise konstant über die Bildserie angenommen.

2.2 Ein allgemeines Modell zur Systemkalibrierung

Ein photogrammetrisches System besteht aus einer Vielzahl von Komponenten. Sie wirken in komplexer Weise zusammen und beeinflussen die Qualität des Endergebnisses, z.B. einer 3D-Koordinatenbestimmung, in vielfältiger Weise. Für die Erzielung optimaler Messgenauigkeiten, für die Optimierung einzelner Komponenten oder für den effizienten Einsatz in der Praxis ist das Verständnis des Gesamtsystems unerlässlich. Bezogen auf die Frage der Kalibrierung soll an dieser Stelle diskutiert werden, ob eine Modellierung jeder einzelnen Komponente möglich und sinnvoll ist, oder ob letztendlich nur ein Modell für das Gesamtsystem entwickelt und parametrisiert wird.

Zur Systematisierung des Gesamtsystems wird zunächst eine Aufteilung in drei schematische Räume vorgenommen (Abb. 1.10):

- physischer Objektraum,
- optischer Bildraum und
- digitaler Bildraum.

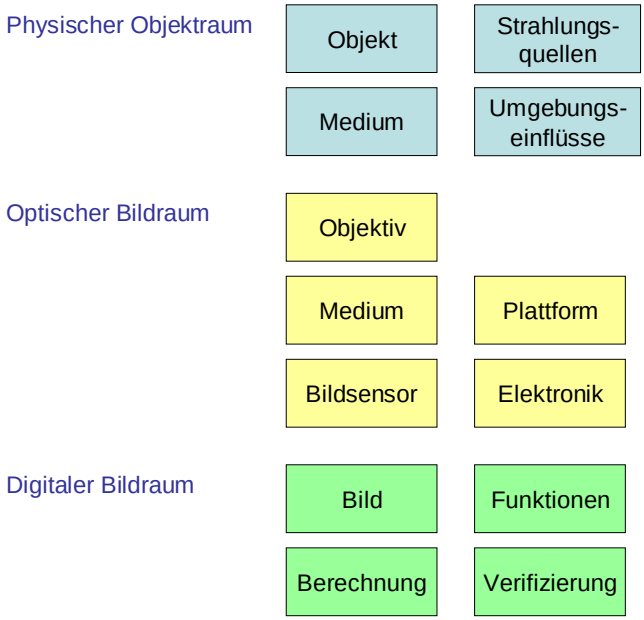


Abb. 1.10: Komponenten eines photogrammetrischen Gesamtsystems

Physischer Objektraum

Der dreidimensionale Objektraum enthält das aufzunehmende Messobjekt[1]. Das Objekt ist durch bekannte und unbekannte Merkmale seiner Gestalt und seiner Oberflächeneigenschaften beschrieben. Es kann zeitlichen Veränderungen unterliegen. Im Objektraum herrschen üblicherweise ein oder mehrere Medien (Luft, Wasser) mit spezifischen physikalisch-chemischen Merkmalen, die sich in individuellen Eigenschaften für Absorption, Refraktion und Extinktion bemerkbar machen. Eine oder mehrere Strahlungsquellen erzeugen die für die optische oder fotografische Abbildung erforderliche Strahlungsenergie, die mit dem Medium und der Objektoberfläche in Wechselwirkung tritt und dort unterschiedlichen Einflüssen unterliegt. Schließlich befindet sich das Aufnahmesystem selbst ebenfalls im Objektraum, es wird jedoch an dieser Stelle als eigene Systemkomponente betrachtet.

[1] Messobjekt, Aufnahmesystem und andere Komponenten können einzeln oder mehrfach vorhanden sein.

Optischer Bildraum

Der optische Bildraum besteht aus dem photogrammetrischen Aufnahmesystem, seinem Bildsensor, dem Objektiv und elektronische Module zur Signalverarbeitung. Im Aufnahmesystem existieren wiederum mehrere optische Medien (Glas, Kunststoff, Luft), die den Strahlverlauf in der Kamera entscheidend beeinflussen. Ebenfalls zum optischen Bildraum wird hier eine Aufnahmeplattform gezählt, die absolute Bewegungen des Aufnahmesystems im Objektraum oder relative Bewegungen zwischen Bildsensor und Objektiv ausführen kann.

Digitaler Bildraum

Der Bildsensor erfasst simultan oder sequentiell flächenhaft verteilte Bilddaten, die im digitalen Bildraum vorliegen. Das hier gespeicherte Bild besitzt geometrische und radiometrische Eigenschaften, die nunmehr durch eine spezifische Verteilung von Grau- oder Farbwerten abgebildet sind. Diese Information wird im digitalen Bildraum durch mathematische Algorithmen und Parameter beschrieben. Die Bestimmung dieser Funktionen erfolgt durch Berechnungsprogramme, die ebenfalls Teil des digitalen Raumes sind. Der digitale Bildraum kann sich sowohl im Prozessor des Aufnahmesystems als auch in einem externen Rechner befinden.

2.2.1 Objektraum

Die Beschreibung und Kalibrierung des Objektraums ist, bezogen auf das Messobjekt, die wesentliche Aufgabe der photogrammetrischen Messung. Das Objekt ist dabei in erster Linie geometrisch zu erfassen, d.h. seine Gestalt, Lage und Orientierung im Raum wird durch eine hinreichende Anzahl diskreter Oberflächenpunkte oder durch Oberflächen beschreibende Funktionen definiert. Das Objekt kann dabei über bekannte Parameter verfügen, etwa vorab eingemessene Passpunkte oder andere geometrische Bedingungen. Es besitzt ein dreidimensionales Koordinatensystem, das physisch repräsentiert oder rechnerisch hergestellt werden kann. Die molekulare Zusammensetzung des Objektes bzw. seiner Oberfläche führt zusammen mit seiner geometrischen Form und Rauhigkeit zu einer objekt- und materialspezifischen Reflexionsfunktion.

Das Objekt tritt über seine Oberfläche in Wechselwirkung mit dem umgebenden Medium bzw. der allgemeinen Umgebung. Das optische Medium (z.B. Luft oder Wasser) besitzt aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung spezifische physikalische Eigenschaften, die sich insbesondere auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen auswirken (Übersichten z.B. in Albertz 2007, Hildebrandt 1996). In den meisten Fällen werden die optischen Medien als homogen und isotrop angesehen, d.h. das gewählte Ausbreitungsmodell wird unabhängig vom Ort des Objektes und des Aufnahmesystems angesetzt. Methoden der Fernerkundung oder Ingenieurgeodäsie zur Modellierung der Atmosphäre werden in der Photogrammetrie praktisch bisher nicht eingesetzt, da die Messung von Atmosphärenparametern während einer Bildaufnahme meist nicht erfolgt oder praktisch unmöglich ist. Ausnahme sind Refraktionskorrekturen für Luftbilder, wenn große Öffnungswinkel oder Schrägaufnahmen vorliegen. Für hochgenaue Anwendungen in der Nahbereichsphotogrammetrie wäre die Erfassung atmosphärischer Parameter (Temperatur, Luftdruck) generell sinnvoll und durchführbar. Hier fehlen jedoch bis heute umfassende Untersuchungen.

Die optische Bilderfassung kann nur gelingen, wenn hinreichend energiereiche Strahlungsquellen verwendet werden. Dazu zählen natürliche Strahlungsquellen (Sonne), künstliche Strahlungsquellen (z.B. Blitz, Leuchten, Laser) und die Eigenstrahlung von Objekten (z.B. emittierte Temperaturstrahlung). Strahlungsquellen sind definiert durch ihre geometrische Lage und Ausrichtung im 3D-Raum, ihre geometrische Abstrahlcharakteristik (z.B. Lambert-Strahler oder gerichteter Strahler) und ihr elektromagnetisches Spektrum. Über diese Parameter tritt die Strahlungsquelle in Wechselwirkung mit dem durchdrungenen Medium, in dem die elektromagnetischen Strahlen in ihrer spektralen Intensität und Ausbreitungsrichtung beeinflusst werden. An der Objektoberfläche kommt es wiederum zu einer Wechselwirkung, da das eingestrahlte Licht an der Oberfläche absorbiert, transmittiert oder

reflektiert wird. Das vom Objekt reflektierte Licht durchdringt wiederum das Medium, unterliegt dort erneut den geometrischen und radiometrischen Einflüssen und wird schließlich von einem oder mehreren Aufnahmesystemen registriert.

Die Kalibrierung des gesamten Objektraumes wird aufgrund der äußeren Randbedingungen nur selten komplett vorgenommen. Weitreichende Entwicklungen finden sich im Bereich der Computergrafik, wo für hochqualitative Visualisierungen Objektoberflächen, Reflexionsfunktionen, Strahlungsquellen und Medium modelliert werden und heute zu nahezu realistischen 3D-Visualisierungen führen (z.B. Watt 2002). Photogrammetrische Ansätze finden sich in der objektraumbezogenen Mehrbildzuordnung, bei der simultan ein geometrisches und ein radiometrischen Modell des Objektes bestimmt werden (Wrobel 1987, Weisensee 1992, Schlüter 1999). Problematisch sind dabei die Korrelationen zwischen den einzelnen Parametergruppen und die mangelhafte Modellbildung der elektromagnetischen Strahlausbreitung.

2.2.2 Optischer Bildraum

Die physikalische Beschreibung des optischen Bildraumes ist relativ überschaubar und in weiten Teilen gelöst. Moderne optische Berechnungsprogramme simulieren den gesamten Strahlverlauf in einem Objektiv unter Berücksichtigung des elektromagnetischen Spektrums, der optischen Trennflächen und materialspezifischer Eigenschaften der optischen Komponenten (Haferkorn 2003). Sind die zugehörigen Parameter bei der Konstruktion und Fertigung von Linsen und Objektiven noch bekannt, so stehen sie dem Anwender anschließend praktisch nicht mehr zur Verfügung. Aufgabe der Kalibrierung ist es hiermit, ein beherrschbares geometrisches und radiometrisches Abbildungsmodell für ein nicht näher bekanntes Objektiv zu ermitteln. Die bisher in der Photogrammetrie eingesetzten Abbildungsmodelle berücksichtigen dabei weder die Objektivkonstruktion noch die Strahlverläufe an optischen Trennflächen, sondern beschränken sich auf die Ermittlung von Parametern, welche die Abweichung vom Modell der Lochkamera beschreiben.

Der Bildsensor ist durch die fotografische oder elektronische lichtempfindliche Schicht eines Bildaufnehmers gekennzeichnet. Für die heute üblichen digitalen Bildsensoren nach CMOS- oder CCD-Prinzip werden einfallende Photonen in Halbleiterelementen pixelweise in Ladungsteilchen umgewandelt, die nach einer elektronischen Signalaufbereitung und A/D-Wandlung in einen Bildspeicher übertragen werden. Digitale Bildsensoren sind äußerst komplexe Bauelemente, deren radiometrische und geometrische Charakteristik durch optische Bedingungen (Mikrolinsen, Aperturgrößen, Farbfilter), Konstruktionsmerkmale und Anordnung der Sensorelemente, Auslese- und Speichersteuerung, elektronische Verstärkung, Quantisierung und andere Einflussgrößen bestimmt wird. Eine exakte Modellierung von Bildsensoren findet üblicherweise nicht statt, sondern beschränkt sich meist auf relativ einfache geometrische Parameter (Pixelgröße, Pixelabstand, Affinität, Sensorunebenheit). Die dem Bildsensor angegliederte elektronische Signalverarbeitung ist von außen nicht einsehbar und führt in vielen Fällen zu nicht nachvollziehbaren Manipulationen der Originalsensordaten. Dazu gehören Korrekturen von Lichtabfall, Filterungen (Schärfeanhebungen), Elimination von Störpixeln, Farbkorrekturen oder Datenkompressionen, die für den Anwender häufig weder erkennbar noch beeinflussbar sind.

Zum optischen Bildraum zählen hier auch mechanische Komponenten, die eine Bewegung des Bildsensors im Aufnahmesystem (z.B. bei scannenden Zeilensensorsystemen) oder eine Bewegung des gesamten Aufnahmesystems im Objektraum zulassen. Die Kalibrierung mechanischer Komponenten ist dann notwendig, wenn die ausgeführte Bewegung zu messbaren Bilddeformationen führt oder wenn eine externe Plattformsteuerung zur Bestimmung der äußeren Orientierung verwendet wird. Beispiele für mechanisch bewegte Bildsensoren im Nahbereich sind Panoramakameras (Abb. 4.30), die erst durch sequentielle Bildaufnahme oder Scannen ein Gesamtbild erzeugen. Die Kalibrierung der dort verwendeten mechanischen Komponenten beinhaltet z.B. die Erfassung von Taumelfehlern oder Exzentrizitäten zwischen Drehachse und Objektiv (Schneider 2008).

2.2.3 Digitaler Bildraum

Im digitalen Bildraum liegt zunächst das vom Aufnahmesystem erzeugte digitale Bild vor. Algorithmen zur Bildverarbeitung, Bildanalyse und Bildmessung greifen auf diesen Datensatz zu und leiten Messgrößen ab, die im Rahmen von 3D-Rekonstruktionsverfahren weiterverarbeitet werden. Radiometrische und geometrische Bildänderungen, verlustbehaftete Kompressionsverfahren oder Manipulationen wirken sich somit auf das Endergebnis aus. Auch haben digitale Messalgorithmen, etwa zur Bestimmung des Zentrums signalisierter Messpunkte, einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis einer Kamerakalibrierung. So erhält man mit unterschiedlich gemessenen Bildkoordinaten auch unterschiedliche Parameter eines Kameramodells.

Das mathematische Modell der optischen Abbildung ist im digitalen Bildraum in Programmen zur Berechnung seiner Parameter hinterlegt. Wenn die Güte des Modells und der Implementierung der physikalischen Realität und den Qualitätsanforderungen einer Anwendung genügt, ist ein technisch und wirtschaftlich sinnvoller Einsatz in der Praxis gegeben. Ein geändertes Abbildungsmodell und geänderte Eingabedaten führen zu einer Änderung des Endergebnisses (z.B. der photogrammetrisch bestimmten 3D-Objektkoordinaten) innerhalb mehr oder weniger vorhersagbarer Intervalle. Eine besondere Bedeutung kommt daher zum einen der Simulation komplexer Datenmodelle zu, z.B. durch Monte-Carlo-Methoden. Zum anderen sind kontrollierbare Verfahren zur Verifizierung praktischer Messergebnisse erforderlich, die eine objektive Prüfung und den Vergleich mit externen Referenzmaßen, z.B. für die Rückführbarkeit auf die Einheit Meter, zulassen.

2.2.4 Fazit

Das in den obigen Abschnitten skizzierte Gesamtmodell einer photogrammetrischen Aufnahme und Auswertung wird derzeit nur in Teilen beherrscht. In der Vergangenheit (siehe Kap. 1.2) wurde das Problem einer vollständigen mathematischen Beschreibung vor allem durch präzise und aufwändige optische und mechanische Konstruktionen umgangen. Durch zunehmende Verwendung preiswerter Komponenten und gleichzeitig stetig zunehmenden Qualitätsanforderungen wächst der Bedarf an verfeinerten Abbildungsmodellen, die möglichst robust gegenüber verschiedensten Randbedingungen (Stabilität der Sensoren, Umgebungsparameter, Handhabung durch Anwender etc.) sind. Dies erfordert letztendlich das Verständnis sämtlicher Einzelkomponenten und ihrer Wechselwirkungen im Gesamtsystem, um gegebenenfalls durch Anpassung der Aufnahme- und Systemkonfiguration nicht beschreibbare Effekte zu minimieren bzw. die Einflussgrößen zu separieren und ihre Wirkung auf das Gesamtergebnis analytisch zu beschreiben.

Die Komplexität dieser verallgemeinerten Systemkalibrierung ist zu hoch, um ein einheitliches analytisches Modell zu entwickeln. Ansätze zur Lösung existieren in einigen Bereichen, bei denen es z.B. erst einmal um die Demonstration von Änderungen an Eingangsparametern auf ein Endergebnis geht, z.B. durch Simulationen komplexer photogrammetrischer Berechnungen mit Monte-Carlo-Methoden (z.B. Hastedt 2004, Luhmann 2005). Die simultane Bestimmung der geometrischen und radiometrischen Objektoberfläche zusammen mit der Orientierung und Kalibrierung wird im Kern durch das Verfahren der objektbasierten Mehrbildzuordnung (Wrobel 1987) und seiner Erweiterungen (Schneider 1991, Weisensee 1992, Schlüter 1999) beschrieben.

Zukünftige Entwicklungen könnten darauf abzielen, die geometrische und radiometrische Kalibrierung von Bildsensoren in einem Modell zu verknüpfen. Dabei kann detaillierter untersucht werden, wie geometrische Abbildung und Farbwerte miteinander korreliert sind und sich ggf. auf die Kalibrierung und 3D-Rekonstruktion auswirken.

3 Physikalische Grundlagen

3.1 Lichtwellen

3.1.1 Elektromagnetisches Spektrum

In der Photogrammetrie beschränkt sich das nutzbare elektromagnetische Spektrum im Wesentlichen auf Wellenlängen im sichtbaren und nahen Infrarotbereich. Begründet ist dies durch die spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Aufnahmesensoren, die bei Nutzung von Filmemulsionen und CCD- bzw. CMOS-Sensoren auf Wellenlängen zwischen ca. 200 nm und 1100 nm beschränkt ist. In spezielleren Anwendungen werden Röntgenstrahlen verwendet (Röntgenphotogrammetrie, z.B. Regensburger 1990), ultraviolette Strahlen (z.B. Huffman 1992) oder Thermalstrahlen (Thermographie, Satzger et al. 2006). In der Fernerkundung werden darüber hinaus Sensoren mit spektralen Empfindlichkeiten im mittleren und thermalen Infrarot sowie für Mikrowellen (Radar) verwendet. Tabelle 3.1 fast die wesentlichen spektralen Bereiche und ihre Sensoren und Anwendungsbereiche für die Photogrammetrie zusammen.

Strahlung	**Wellenlänge**	**Sensoren**	**Anwendungen**
Röntgen	10 pm – 1 nm	Röntgengerät	Medizinische Diagnostik, Materialprüfung
Ultraviolett (schwach)	300 nm – 380 nm	CCD, CMOS, Si-Detektoren	Fernerkundung, UV-Reflektografie
Sichtbares Licht	380 nm – 720 nm	CCD, CMOS, Film	Fotografie, Photogrammetrie, Fernerkundung
Nahes Infrarot	720 nm – 3 µm	CCD, CMOS, Film	IR-Reflektographie, Photogrammetrie, Fernerk.
Mittleres Infrarot	3 µm – 5 µm	Ge-, PbSe- und PbS-Detektoren	Fernerkundung
Thermales Infrarot	8 µm – 14 µm	Mikrobolometer, InSb bzw. GaAs QWIP Detektoren	Thermographie, Materialprüfung, Bauwesen
Mikrowellen	1 cm – 30 cm	Radarantenne	Radargrammetrie, Fernerkundung

Tab. 3.1: Ausgewählte elektromagnetische Strahlungen, Sensoren und Anwendungen

Die Ausbreitung der elektromagnetischen Strahlung wird entweder als Wellenausbreitungsmodell oder als Photonenstrom beschrieben. Beide Modelle haben in der Photogrammetrie ihre Relevanz. Die Welleneigenschaften des Lichtes werden zur Beschreibung von optischer Abbildung, Brechung, Beugung und Abbildungsfehlern herangezogen. Die Teilcheneigenschaften des Lichtes sind nützlich, die Umwandlung von Lichtenergie in Elektronen innerhalb von Bildsensoren (CCD, CMOS) zu verstehen. Ausführliche Darstellungen dazu finden sich z.B. in Holst (1996) und Haferkorn (2002).

3.1.2 Brechung und Reflexion

Die *Brechzahl* (Brechungsindex) n ist das Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Licht in zwei verschiedenen Medien:

$$n = \frac{c_1}{c_2} \qquad \text{: Brechzahl (Brechungsindex)} \tag{3.1}$$

Für die Angabe materialabhängiger Brechzahlen wird für c_1 die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum oder in Luft eingesetzt:

$$n = \frac{c_{Luft}}{c} \tag{3.2}$$

Die Brechzahl von Wasser beträgt je nach Temperatur und chemischer Zusammensetzung n=1.33, die von Glas je nach Material 1.45 bis 1.95. Im Allgemeinen geht man von homogenen und isotropen Medien aus. Tritt ein Lichtstrahl von einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium an einer Trennfläche T ein, wird er nach dem Snellius'schen Brechungsgesetz zum Einfallslot hin gebrochen (Abb. 3.1).

$$n_1 \cdot \sin \varepsilon_1 = n_2 \cdot \sin \varepsilon_2 \qquad \text{: Brechungsgesetz} \tag{3.3}$$

oder als Funktion des Tangens:

$$\frac{\tan \varepsilon_1}{\tan \varepsilon_1} = \sqrt{n^2 + (n^2 - 1)\tan^2 \varepsilon_1} \tag{3.4}$$

$$\text{mit } n = \frac{n_2}{n_1} \text{ und } n_2 > n_1$$

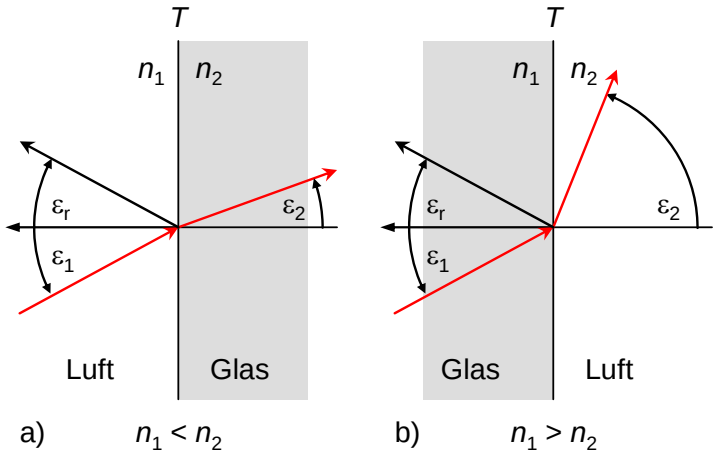


Abb. 3.1: Brechung und Reflexion (nach Schröder 1990)

Bei *Reflexion* gilt $n_2 = -n_1$ und es ergibt sich das Reflexionsgesetz:

$$\varepsilon_r = -\varepsilon_1 \qquad \text{: Reflexionsgesetz} \tag{3.5}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht ist wellenlängenabhängig. Die damit verbundene Änderung von Brechung und Reflexion wird als *Dispersion* bezeichnet. Für den Abbildungsvorgang in einem optischen System

bedeutet dies, dass jede Wellenlänge in einem anderen Winkel abgebildet wird und somit zur *chromatischen Aberration* führt (siehe Kap. 3.2.4.2).

3.1.3 Beugung

Beugung tritt auf, wenn die geradlinige Ausbreitung der kugelförmigen Wellenausbreitung des Lichtes gestört wird, z.B. beim Durchgang durch einen Spalt (Blende). Statt der idealen punktförmigen Abbildung ergibt sich ein Beugungsscheibchen, dessen Intensitätsverteilung durch Interferenzlinien bestimmt wird (Abb. 3.2).

Die unter einem Phasenwinkel φ beobachtete Intensität *I* lautet:

$$I(\varphi) = \frac{\sin x}{x} = \mathrm{sinc}(x) \tag{3.6}$$

mit $x = \frac{\pi \cdot d' \cdot \sin\varphi}{\lambda}$

d': Spaltgröße
λ: Wellenlänge
φ: Phasenwinkel

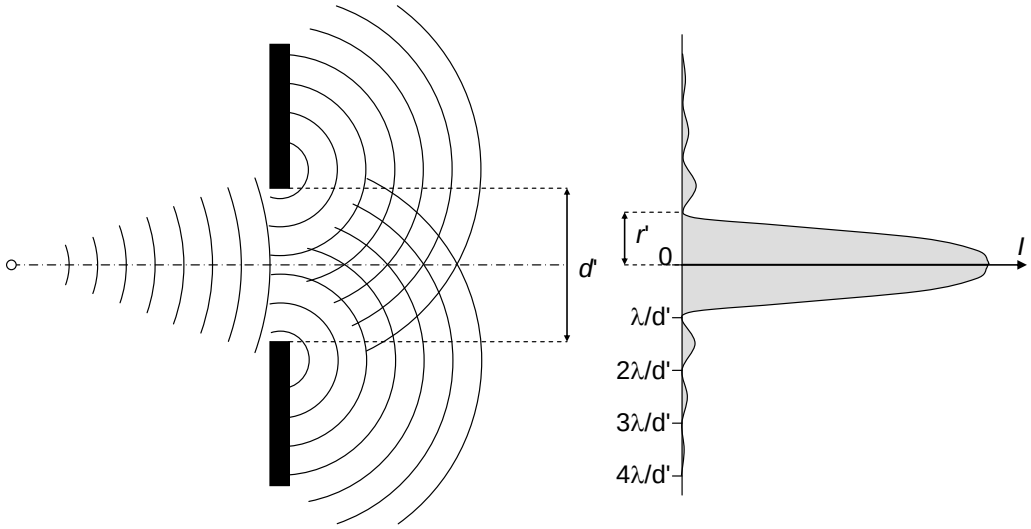


Abb. 3.2: Beugung an einer Spaltblende

Die Intensität wird zum Minimum an den Stellen

$$\sin\varphi_n = n \cdot \frac{\lambda}{d'} \qquad n=1,2,\ldots \tag{3.7}$$

Der Radius r' des ersten Interferenzringes (n=1) in der Bildebene ergibt sich entsprechend zu:

$$r' = \frac{\lambda}{d'} \cdot f' = \lambda \cdot k \tag{3.8}$$

mit
f': Brennweite
k Blendenzahl (siehe Gl. 3.14)

Beugung findet nicht nur an Bündelbegrenzungen wie Blenden oder Objektiveinfassungen statt, sondern auch an (regelmäßigen) Gitterstrukturen, wie sie durch die Anordnung von Sensorelementen auf Bildsensoren vorliegen. Zusammen mit Abweichungen von der Linsengleichung (3.9) (Defokussierung) führt Beugung zur so genannten Punktverwaschungsfunktion (*point spread function* PSF), deren wellenlängenabhängige Auswirkung durch die Kontrast- oder Modulationsübertragungsfunktion bestimmt wird.

3.2 Optische Abbildung

3.2.1 Konstruktion der optischen Abbildung

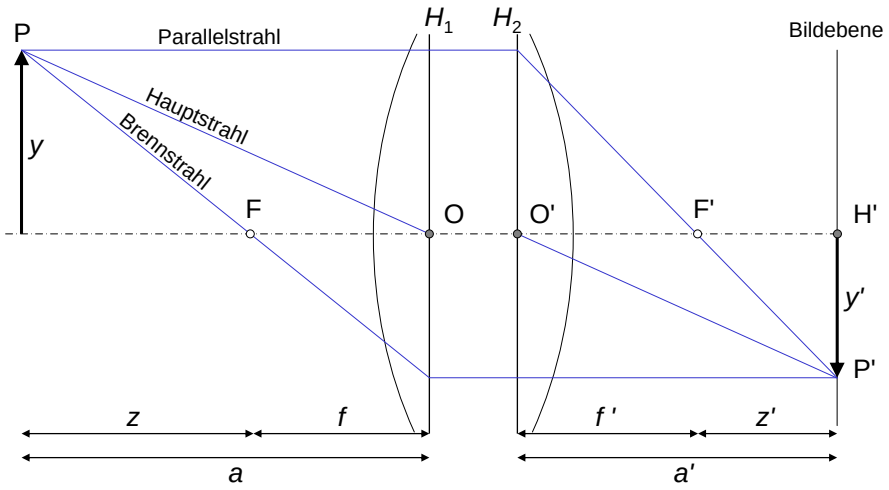


Abb. 3.3: Konstruktion der optischen Abbildung für dünne Linsen

Das bekannte optische Abbildungsmodell für dünne Linsen ist in Abb. 3.3 dargestellt. Aus den dargestellten Abbildungsverhältnissen lassen sich die Linsengleichungen ableiten (z.B. Haferkorn 2002, Schröder & Treiber 2007):

$$\frac{1}{a'} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \tag{3.9}$$

$$z \cdot z' = -f'^2 \tag{3.10}$$

mit

a:	Dingweite (Gegenstandsweite, Aufnahmeabstand)
a':	Bildweite (Kameraauszug) ≈ Kamerakonstante c
f, f':	ding- und bildseitige Brennweite
z, z':	brennpunktbezogene Ding- bzw. Bildweite
H_1, H_2:	ding- und bildseitige Hauptebenen
O, O':	optische Hauptpunkte

Im Falle unterschiedlicher Medien im Objekt- und Bildraum wird Gleichung (3.9) erweitert zu

$$\frac{n}{a'} - \frac{n'}{a} = \frac{n'}{f'} \tag{3.11}$$

mit
n: Brechzahl im Objektraum
n': Brechzahl im Bildraum

Die optische Achse ist definiert durch die Gerade zwischen den Punkten O und O', welche ihrerseits die Mittelpunkte der beiden Hauptebenen H_1 und H_2 sind. Sie werden in der Optik als *optische Hauptpunkte* bezeichnet. Als bild- und objektseitige *Knotenpunkte* K bzw. K' werden diejenigen Punkte auf der optischen Achse bezeichnet, die ein Strahl durchläuft, dessen Eintrittswinkel gleich dem Austrittswinkel ist. Wenn bild- und objektseitig dieselbe Brechzahl vorliegt, fallen Knotenpunkte und Hauptpunkt zusammen. Die optische Achse trifft im *Autokollimationspunkt* H' auf die Bildebene, der bei zentrierter Linsenlage und senkrechter Bildebene dem photogrammetrischen Bildhauptpunkt entspricht (siehe Kap. 3.3.1).

Weiterhin lässt sich der Abbildungsmaßstab β' angeben:

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} = -\frac{z'}{f'} = 1 : m_b \tag{3.12}$$

bzw. im Mehrmedienfall zu

$$\beta' = \frac{n}{n'}\frac{a'}{a} \tag{3.13}$$

Die Scharfabbildung eines Objektpunktes P erfolgt im Abstand a' von der bildseitigen Hauptebene H_2. Bei unendlicher Aufnahmeentfernung ist $a' = f'$. Die fokussierte Bildweite a' entspricht in guter Näherung der photogrammetrischen Kamerakonstanten c. Mit m_b wird die in der Photogrammetrie übliche Bildmaßstabszahl bezeichnet.

3.2.2 Bündelbegrenzung

Sämtliche bündelbegrenzende Elemente eines optischen Systems können als Blenden aufgefasst werden. Dazu gehören in erster Linien Objektiveinfassungen und die mechanische Blende (Aperturblende, Irisblende) selbst. Blenden begrenzen das einfallende Strahlenbündel und tragen somit unter anderem zur Regelung von Lichtmenge und Schärfentiefe bei.

Das objektseitige Bild der Blende wird mit Eintrittspupille *EP* bezeichnet, das bildseitige Bild entsprechend Austrittspupille *AP*. Die Blendenzahl k ist definiert als Quotient aus bildseitiger Brennweite f' und Durchmesser der Eintrittspupille d':

$$k = \frac{f'}{d'} \qquad \text{: Blendenzahl} \tag{3.14}$$

Bei symmetrisch aufgebauten Objektiven ist der Durchmesser von *AP* und *EP* gleich. In diesem Fall fallen *EP* und *AP* mit den Hauptebenen H_1 bzw. H_2 zusammen (Abb. 3.4). Dann, und nur dann, werden einfallende und ausfallende Abbildungsstrahlen unter demselben Winkel τ abgebildet. Unsymmetrische Objektive entstehen durch asymmetrisch aufgebaute Linsen und/oder durch eine asymmetrisch zwischen den Hauptebenen angebrachte

Blende (Abb. 3.5). Unterschiedliche Ein- und Ausfallwinkel τ führen zur radial-symmetrischen Objektivverzeichnung Δ*r*' (Kap. 3.2.3).

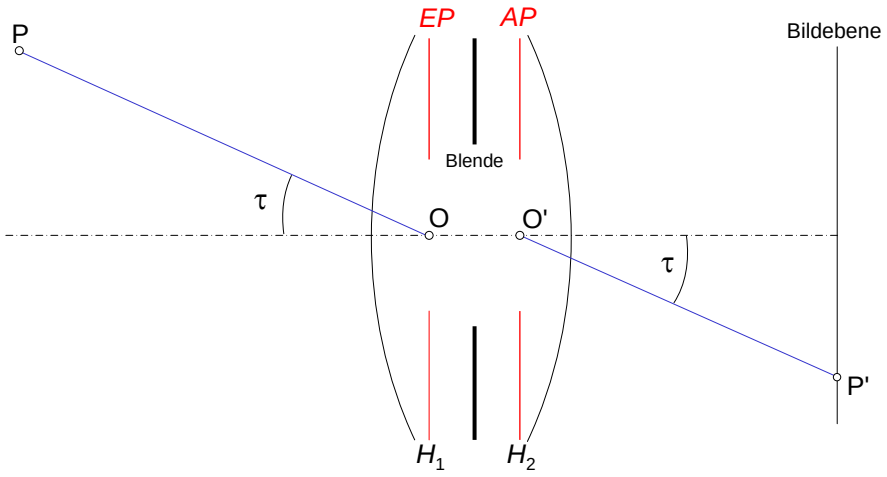


Abb. 3.4: Symmetrische Objektivkonstruktion

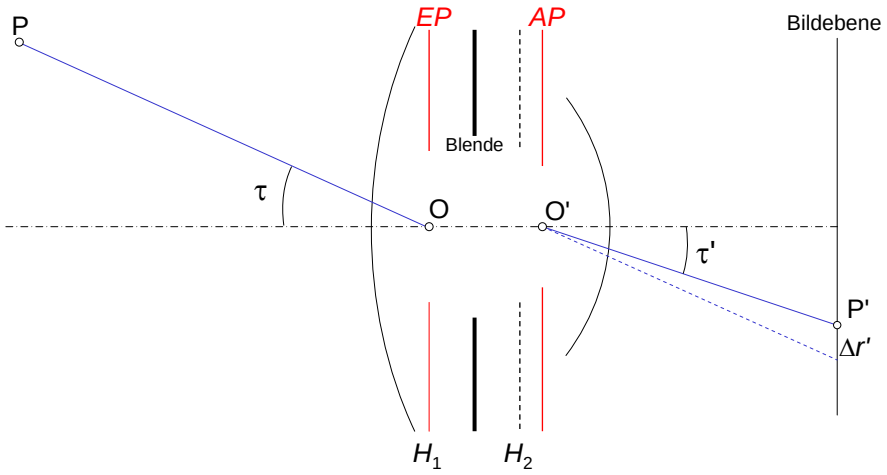


Abb. 3.5: Asymmetrische Objektivkonstruktion

3.2.3 Projektionszentrum

Das Projektionszentrum ist mathematisch gesehen der Punkt der Zentralperspektive, durch den alle Bildstrahlen (geradlinig) laufen. In der optischen Abbildung eines (mehrlinsigen) Objektivs existiert dagegen sowohl ein dingseitiges als auch ein bildseitiges Projektionszentrum, das jeweils durch den Schnittpunkt von Eintrittspupille *EP* bzw. Austrittspupille *AP* mit der optischen Achse definiert ist (Abb. 3.4 und Abb. 3.5). Die Lage der Projektionszentren ist also blendenabhängig.

3.2.4 Abbildungsfehler

In der Optik werden Abbildungsfehler, die bei Verwendung von monochromatischem Licht auftreten, als geometrische Fehler bezeichnet. Die durch Dispersion entstehenden Abbildungsfehler werden als Farbfehler oder chromatische Fehler bezeichnet. In der Photogrammetrie werden die einzelnen optischen Abbildungsfehler (Ausnahme: radial-symmetrische Verzeichnung) üblicherweise nicht nach ihren Ursachen oder ihrem Auftreten gemäß der

optischen Gesetzmäßigkeiten behandelt, sondern nur deren Auswirkung im Bild beschrieben. Eine fundierte physikalische Ursachenforschung ist jedoch immer dann angebracht, wenn sich mehrere Abbildungsfehler zu komplexen Bildfehlerfiguren überlagern.

3.2.4.1 Verzeichnung

Da der Idealfall einer symmetrischen und linsenzentrierten Abbildung nach Abb. 3.4 in der Praxis nie erfüllt ist, werden abgebildete Punkte aufgrund der Abweichung zwischen Einfallswinkel τ und Ausfallswinkel τ' im Bildraum um den Betrag $\Delta r'$ verzeichnet. Dieser Effekt wird als Verzeichnung bezeichnet und ist radial-symmetrisch zu einem Symmetriepunkt S', der nur im Idealfall mit dem Autokollimationspunkt H' zusammenfällt. Die Richtung oder das Vorzeichen von $\Delta r'$ hängen von der Konstruktion des Objektivs, insbesondere der Lage der Blende ab.

Dabei entsteht nach Abb. 3.6 tonnenförmige Verzeichnung, wenn die Blende objektseitig verschoben ist und kissenförmige Verzeichnung bei bildseitiger Blendenlage. Verzeichnungsfreie Abbildung ist bei orthoskopischer Abbildung gegeben.

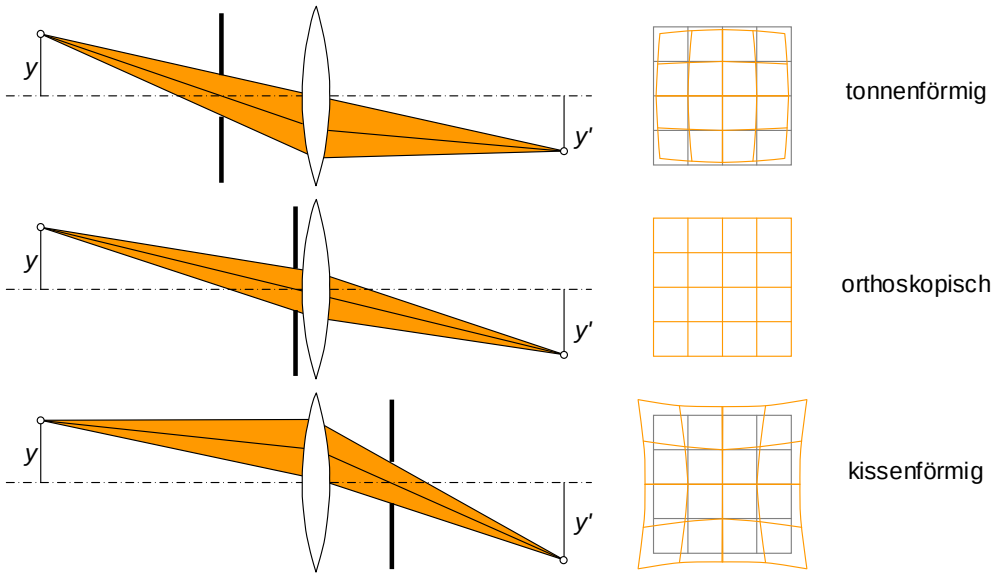


Abb. 3.6: Verzeichnung in Abhängigkeit der Blendenlage

Radial-symmetrische Verzeichnung kann als radiusabhängige Maßstabsänderung im Bild interpretiert werden. Die relative Verzeichnung ist definiert durch

$$\frac{\Delta r'}{r'} = \frac{\Delta x'}{x'} = \frac{\Delta y'}{y'} \tag{3.15}$$

Nach Division z.B. durch y erhält man die relative Maßstabsänderung

$$\frac{\Delta \beta'}{\beta'} = \frac{\Delta y'}{y'} = f(\tau) \tag{3.16}$$

Für $\Delta y'/y' < 0$ ist die Abbildung zu klein, d.h. das Objekt wird zur optischen Achse hin gestaucht – es entsteht tonnenförmige Verzeichnung. Entsprechend hat das optische System bei $\Delta y'/y' > 0$ kissenförmige Verzeichnung. Abb. 3.7 zeigt den Effekt bei einer realen Bildaufnahme.

Abb. 3.7: Kissen- und tonnenförmige Verzeichnung in einem aufgenommenen Bild

3.2.4.2 Chromatische Aberration

Die *chromatische Aberration* entsteht durch wellenlängenabhängige Dispersion im Objektiv. Der *Farblängsfehler* (longitudinale chromatische Aberration) führt dazu, dass jede Wellenlänge einen eigenen Brennpunkt besitzt. Ein abgebildeter weißer Objektpunkt wird im Bild in unterschiedlichen Bildweiten abgebildet, so dass keine optimale Fokussierung möglich ist (siehe Abb. 3.8). Je nach Qualität eines Objektivs kann dieser Effekt durch unterschiedliche Linsentypen und Beschichtungen reduziert werden. Wird die Abbildungsebene auf eine mittlere Wellenlänge (z.B. grün) gelegt, so entstehen im blauen und im roten Bereich Abbildungsfehler, die im Mittel auf ein Minimum reduziert werden (Übersichten in Pedrotti et al. 2002, Schröder 1990).

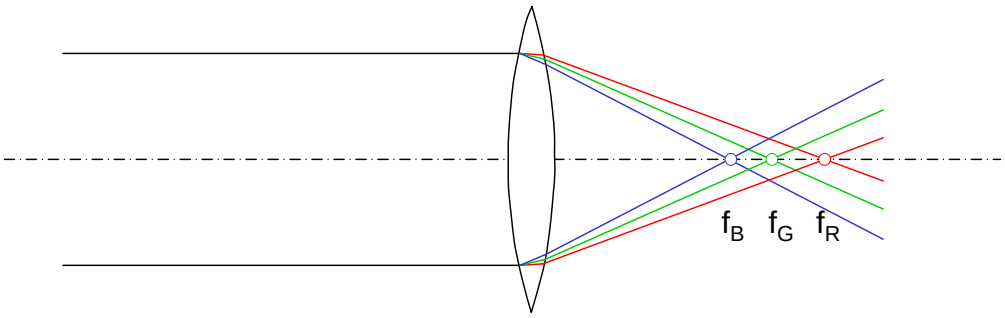
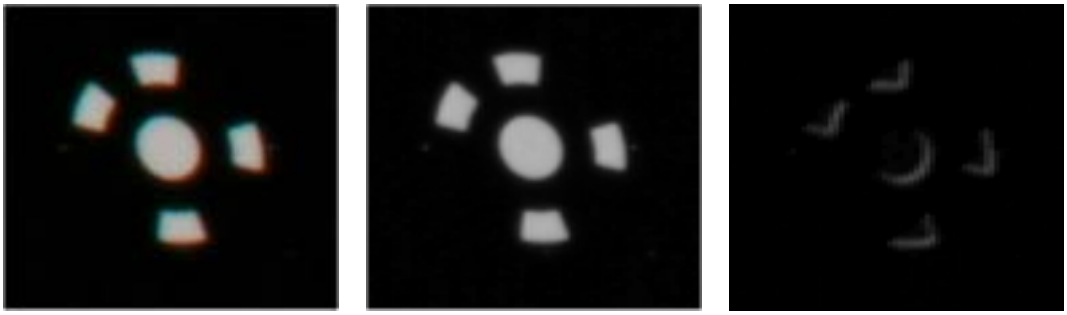


Abb. 3.8: Farblängsfehler

In der Praxis führt chromatische Abberation zu einer schlechteren Schärfeleistung. Sogenannte Achromate sind Objektive, deren Aufbau so gestaltet ist, dass die chromatische Aberration unter eine sichtbare Größenordnung fällt.

Der *Farbquerfehler* (Farbvergrößerungsfehler oder transversale chromatische Aberration) führt dazu, dass ein Objekt mit unterschiedlichem Abbildungsmaßstab in Abhängigkeit vom Bildradius abgebildet wird. Für monochromatisches Licht entspricht der Effekt der radial-symmetrischen Verzeichnung, für polychromatisches Licht führt der Farbquerfehler zu einer radial wirkenden Farbverschiebung.



a) RBG-Originalbild b) Grüner Kanal c) Differenzbild Rot - Grün

Abb. 3.9: Farbverschiebung an einer schwarz-weißen Kante

Der Effekt kann in digitalen Farbbildern leicht gezeigt werden. Abb. 3.9a zeigt die mangelnde Abbildungsqualität weißer Zielmarken in einem Farbbild. Deutlich sind Farbfehler an den Kanten der Marken erkennbar, wie sie auch bei jeder anderen Objektkante entsprechend auftreten werden. Abb. 3.9b zeigt den grünen Kanal mit einer hinreichenden Bildqualität, wie sie für eine photogrammetrische Punktmessung in der Regel ausreicht. Das Differenzbild in Abb. 3.9c macht die Farbverschiebung zwischen grünem und rotem Kanal deutlich.

Die chromatische Aberration führt bei Schwarz-Weiß-Kameras zu einer unscharfen Kantendarstellung. Bei Farbkameras werden bunte Farbsäume sichtbar, besonders an Kanten mit Schwarz-Weiß-Übergängen. Die Farbqualität ist dabei auch abhängig von der Art der Farbtrennung (z.B. Bayer-Masken) und der in Digitalkameras üblichen Bildvorverarbeitung, z.B. in Form von Farb- oder Schärfekorrekturen.

3.2.4.3 Sphärische Aberration

Die *sphärische Aberration* (Öffnungsfehler) bewirkt für Abbildungsstrahlen, die unter verschiedenen Bildwinkeln einfallen, eine Verschiebung des Bildpunktes in z'-Richtung.

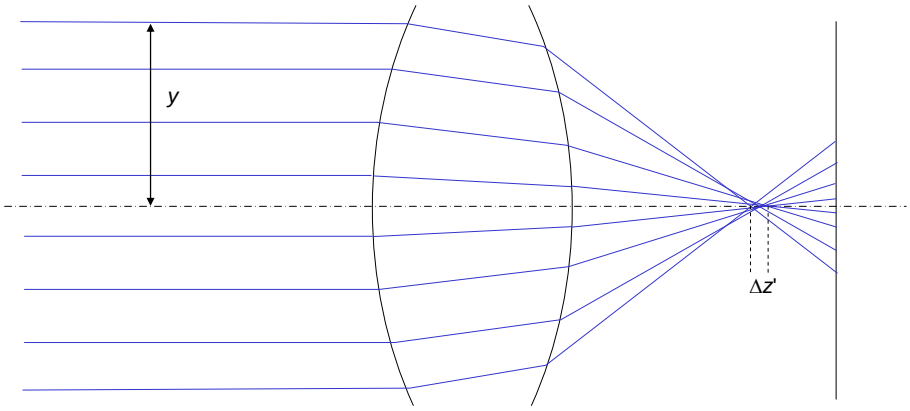


Abb. 3.10: Sphärische Aberration

Der Versatz in Längsrichtung $\Delta z'$ hängt quadratisch von der Einfallhöhe y ab. Durch Abblenden lässt sich der Öffnungsfehler erheblich verringern. Er wirkt sich im Bild kontrastschwächend und durch leicht verringerte Schärfe aus. Im photogrammetrischen Sinne kann man schließen, dass sphärische Aberration zu einer Verschiebung des Projektionszentrums für unterschiedliche Bildwinkel führt. Qualitativ gute Objektive sind weitgehend frei von sphärischer Aberration, so dass dieser Abbildungsfehler in der photogrammetrischen Kamerakalibrierung nicht berücksichtigt wird.

3.2.4.4 Astigmatismus und Bildfeldwölbung

Astigmatismus und *Bildfeldwölbung* treten auf für abseits der optischen Achse einfallende Strahlenbündel. Sie treffen in unterschiedlichem Winkel auf die brechenden Flächen der Linsen und bewirken unterschiedliche Abbildungen in horizontaler und vertikaler Richtung (Abb. 3.11). Betrachtet man die zwei senkrecht aufeinander stehenden meridionalen und sagittalen Schnittebenen M_1M_2 bzw. S_1S_2, treffen diese sich im Bildraum nicht mehr in einem einzelnen Punkt, sondern in zwei Bildlinien (Abb. 3.12). Ein Objektpunkt erscheint dadurch im Bild als unscharfes Oval oder als elliptischer Fleck.

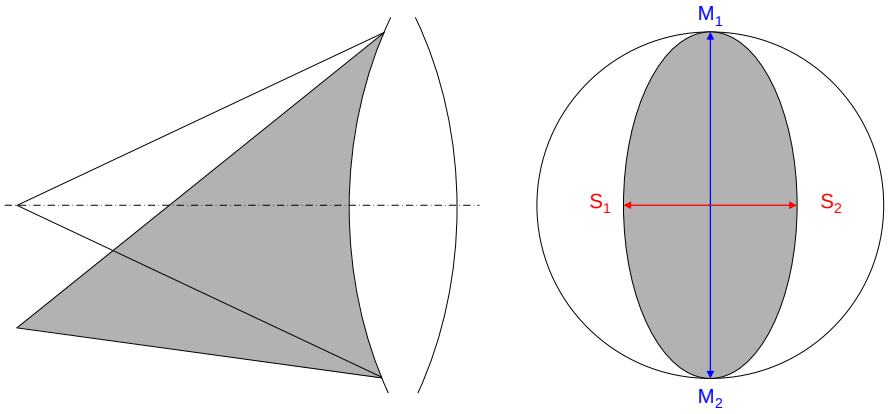


Abb. 3.11: Elliptischer Schnitt schiefer Bündel (nach Marchesi 1985)

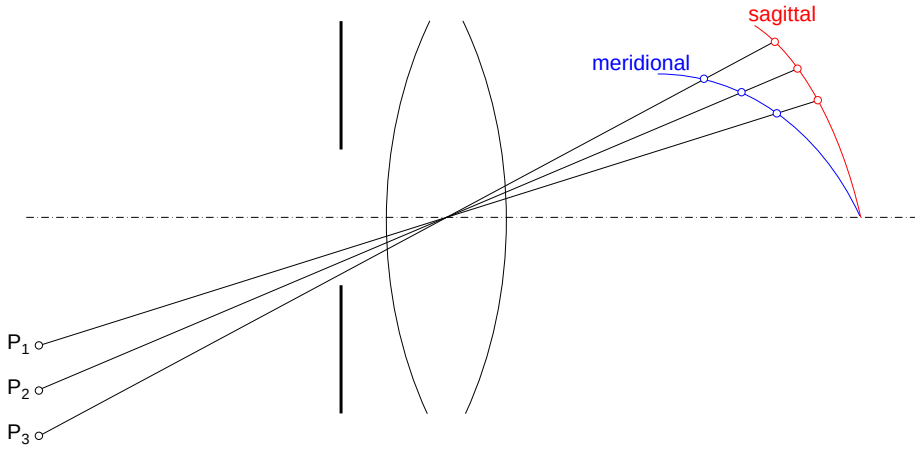


Abb. 3.12: Astigmatismus (nach Schröder 1990)

Die nach Abb. 3.12 entstehenden gekrümmten Abbildungsflächen (Bildschalen) werden als Bildfeldwölbung bezeichnet. Eigentlicher Astigmatismus liegt vor, wenn meridionale und sagittale Bildschale auseinanderfallen.

Die Auswirkungen von Astigmatismus und Bildfeldwölbung im Bild sind wie bei der sphärischen Aberration abhängig von der Bündelneigung. Der Abbildungsfehler kann verringert werden, wenn abgeblendet wird und wenn im Objektiv geeignete Linsenkrümmungen und Kombinationen von Linsen verwendet werden. Eine Berücksichtigung in der photogrammetrischen Kalibrierung findet üblicherweise nicht statt, da angenommen wird, dass dieser Effekt unterhalb messbarer Größen durch entsprechende Objektivkonstruktion korrigiert ist.

3.2.4.5 Koma

Zusätzlich zu Öffnungsfehler und Astigmatismus treten für weit geöffnete und geneigte Strahlenbündel unsymmetrische Fehler auf, die als *Koma* bezeichnet werden. Sie bewirken die Abbildung punktförmiger Objekte als tropfen- oder kometenartige Figuren mit ungleichmäßiger Lichtverteilung.

3.3 Photogrammetrische Modelle

3.3.1 Projektionszentrum, Bildhauptpunkt und Verzeichnung

In der Photogrammetrie hat sich ein Modell etabliert, bei dem ausschließlich das bildseitige Projektionszentrum O' als Bezugspunkt für die geometrische Abbildung verwendet wird. Die exakte dreidimensionale Lage des Projektionszentrums im Kamera- oder Bildkoordinatensystem (siehe Abb. 3.1) wird durch Kalibrierung bestimmt. Abweichend vom optischen Projektionszentrum O' wird ein mathematisches Projektionszentrum O_m definiert, das entlang der optischen Achse so verschoben wird, dass die Summe aller radial-symmetrischen Verzeichnungsanteile minimal wird (Kraus 2004).

Der radiale Versatz berechnet sich gemäß Abb. 3.13 wie folgt:

$$\Delta r' = r' - c \cdot \tan \tau \tag{3.17}$$

Die Verzeichnung ist in dieser Formulierung also abhängig von der Kamerakonstante c. Wie später diskutiert wird, ist damit die Bestimmung von Korrekturfunktionen für die radial-symmetrische Verzeichnung direkt mit der Bestimmung der Kamerakonstanten verbunden. $\Delta r'$ und c sind linear abhängig.

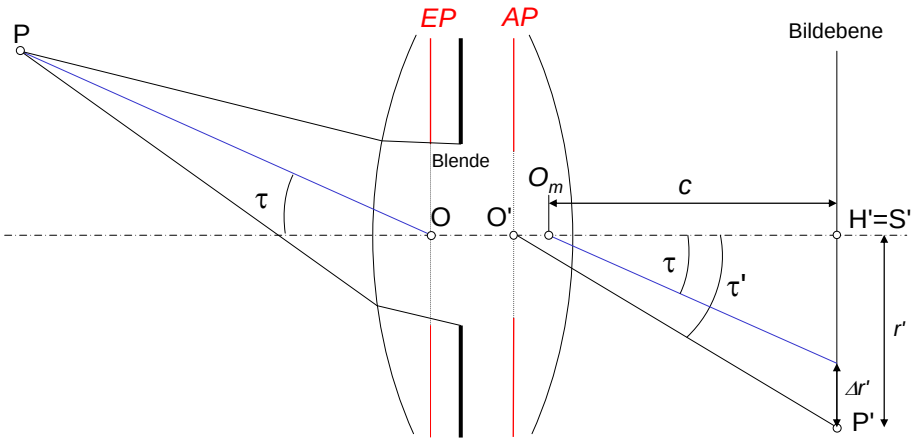


Abb. 3.13: Projektionszentrum und Kamerakonstante (nach Kraus 1994)

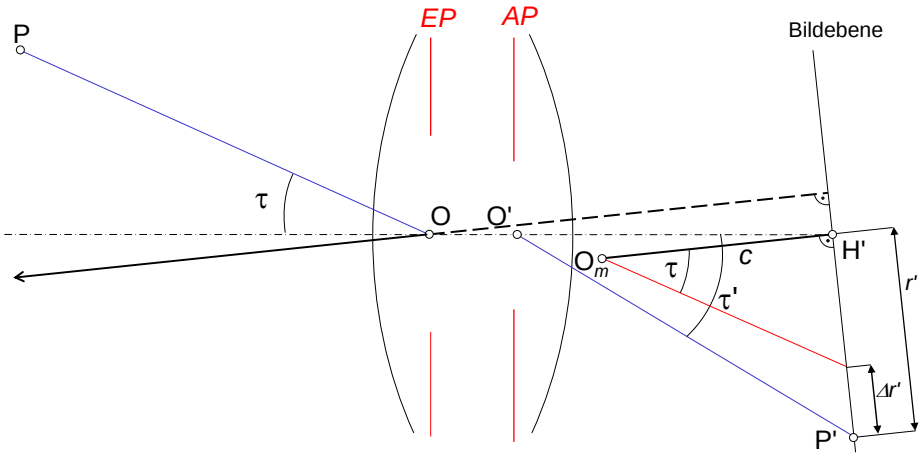


Abb. 3.14: Zur Definition des Bildhauptpunktes bei geneigter Bildebene (nach Kraus 1994)

Bei nicht senkrecht zur optischen Achse stehender Bildebene liegt O_m außerhalb der optischen Achse (Abb. 3.14). Der Bildhauptpunkt H' (Autokollimationspunkt) ist der Lotfußpunkt von O_m und liegt im Allgemeinen nur näherungsweise in der Bildmitte.

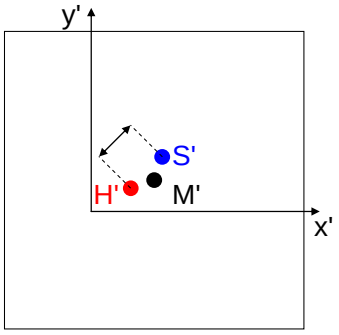


Abb. 3.15: Mögliche Lage von Bildhauptpunkt, Symmetriepunkt, Bildmittelpunkt und Ursprung des Bildkoordinatensystems

Neben dem oben definierten Bildhauptpunkt H' tritt der Symmetriepunkt der Verzeichnung S' auf. Er entspricht als Punkt optimaler Symmetrie (Hakkarainen 1985, Regensburger 1990) dem Durchstoßpunkt der optischen Achse in der Bildebene. Bildmittelpunkt M', Symmetriepunkt S' und Bildhauptpunkt H' fallen streng genommen nicht zusammen (Abb. 3.15). Des Weiteren ist zu beachten, dass der Ursprung des Bildkoordinatensystems beliebig gelegt werden kann. Bei werkskalibrierten Messkameras (z.B. Reihenmesskameras) wird durch Justierung dafür gesorgt, dass S' mit H' im Bereich von 10 µm zusammenfallen. Der Abstand H'S' kann als Maß für die Asymmetrie eines Objektivs aufgefasst werden. In Kap. 6.3 wird ein Anwendungsfall diskutiert, in dem es aufgrund beweglicher Linsenelemente zu einer deutlichen Ablage beider Punkte kommt, die im Rahmen einer Selbstkalibrierung jedoch erfasst und kompensiert werden kann.

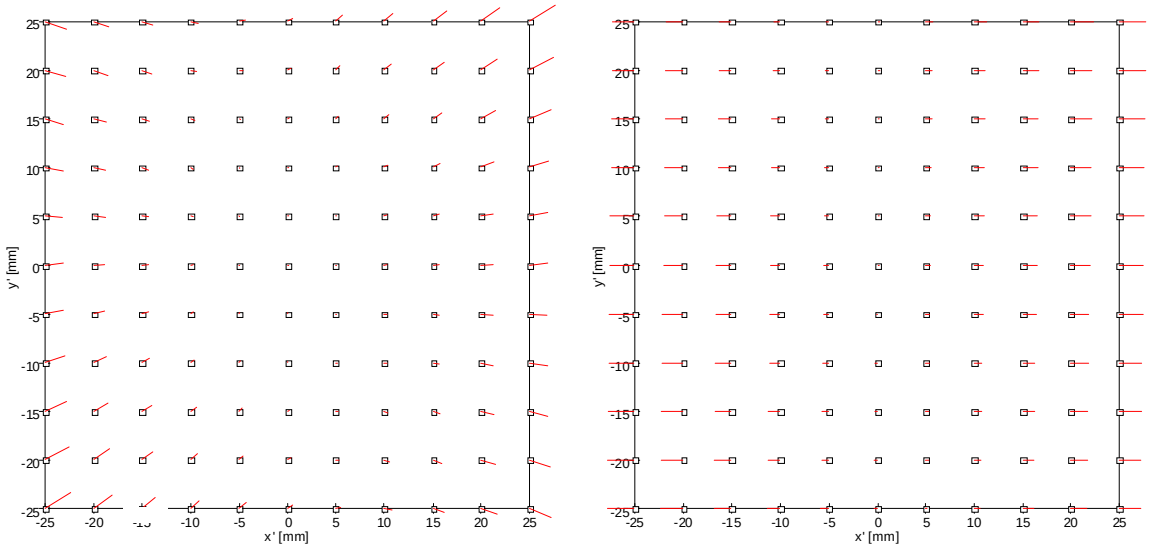
Die photogrammetrische Bezugsachse ist durch die Gerade O_mH' definiert. Im Dingraum ist es der dazu parallel verlaufende, durch O gehende Strahl[1]. Der Bildradius eines Bildpunktes r' und die Restfehler der radialsymmetrischen Verzeichnung $\Delta r'$ beziehen sich jeweils auf den Bildhauptpunkt H', sofern Hauptpunkt und Symmetriepunkt zusammenfallen (siehe Gl. 4.16).

3.3.2 Asymmetrische Abbildungsfehler

3.3.2.1 Dezentrierung von Linsen

Schiefstellung und Dezentrierung von einzelnen Linsen eines Objektivs führen zu asymmetrischen Verzeichnungen. Sie sind bei hochqualitativen Kameras häufig vernachlässigbar klein. Einfache und nicht für Messzwecke vorgesehene Kameras und Objektive besitzen jedoch häufig signifikant schief oder dezentriert montierte Linsen. Als Folge ist die optische Achse innerhalb des Systems gekrümmt und die ansonsten radial-symmetrischen Abbildungsfehler werden von tangentialen und asymmetrischen Anteilen überlagert.

[1] Üblicherweise wird nur die Bezeichnung O oder O' verwendet, auch wenn O_m gemeint ist.



a) Tangentiale und asymmetrische Verzeichnung b) Affinität und Scherung

Abb. 3.16: Auswirkung asymmetrischer Abbildungsfehler

Die Dezentrierung von Linsen wird in der Photogrammetrie durch Korrekturfunktionen zur Modellierung tangentialer und asymmetrischer Verzeichnung kompensiert (Abb. 3.16a, siehe Kap. 4.2.2).

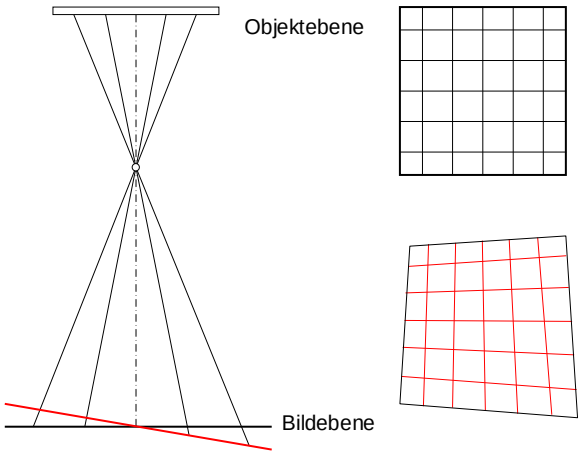


Abb. 3.17: Projektive Abbildungsfehler bei geneigter Bildebene

3.3.2.2 Sensorschiefe

Eine Schiefstellung des Sensors kann verursacht sein durch nicht rechtwinkligen Einbau im Kameragehäuse oder durch Einwirkungen der Schwerkraft oder anderer mechanischer Kräfte. Eine nicht senkrecht zur optischen Achse stehende Bild- oder Sensorebene führt zu projektiven Abbildungsfehlern, die entsprechend der projektiven Abbildung von Strahlenbündeln in Erscheinung treten (Abb. 3.17).

Affine Verzerrungen entstehen durch nicht-rechtwinklige und/oder ungleichmaßstäbige Bildkoordinatenachsen. Bei analogen Systemen treten diese Effekte z.B. durch Film- oder Papierverzug auf und können durch entsprechend abgebildete Rahmenmarken oder Réseaupunkte korrigiert werden. Bei elektronischen und digitalen Bildsensoren werden affine Verzerrungen durch nicht quadratische Pixel, Abweichungen von der Orthogonalität der

Sensorelemente oder Einflüsse bei der A/D-Wandlung (z.B. Videodigitalisierung) verursacht (El-Hakim 1986, Beyer 1992). Ihre Auswirkung im Bild veranschaulicht Abb. 3.16b.

3.3.2.3 Unebene Bildfläche

Die oben eingeführten Konstruktionen und Vorschriften der geometrischen Abbildung setzen allesamt eine ebene Bildfläche voraus. Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, treten im Bildraum nicht-lineare Lagefehler auf. Sie wirken ähnlich wie nicht berücksichtigte Geländehöhenunterschiede bei der Erstellung von Orthophotos oder projektiven Bildentzerrungen (Abb. 3.18). In Abhängigkeit des Bildwinkels τ', der Bildgröße r' und der Sensorunebenheit $\Delta h'$ resultiert ein Lageversatz $\Delta r'$.

$$\Delta r' = \Delta h' \frac{r'}{z'} = \Delta h' \tan \tau' \tag{3.18}$$

Der Lageversatz im Bild wird nach Gl. (3.18) größer bei kürzeren Bildweiten (Weitwinkel) z', zunehmendem Abstand von der optischen Achse r' und zunehmender Unebenheit $\Delta h'$. So muss der Sensor bei einem Bildwinkel von 45° so eben sein wie es die Lagegenauigkeit gemessener Bildpunkte erfordert. Da diese mit weniger als 0.5µm angenommen werden kann, werden an die Sensorebenheit zumindest an die Bildrändern sehr hohe Anforderungen gestellt.

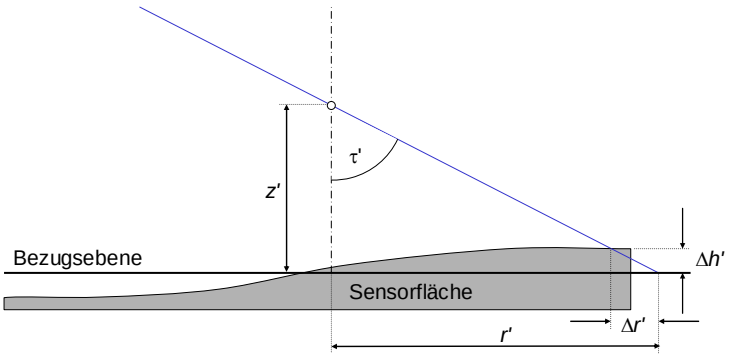


*Abb. 3.18: Einfluss einer Sensorunebenheit Δ*h

Sensordeformationen oder andere, nicht durch analytische Funktionen beschreibbare Abbildungsfehler können im Bild durch geeignete Gitterkorrekturmodelle aufgefangen werden. Die Modellierung kann auf Basis finiter Elemente (Kap. 5.2.1) oder im Extremfall für jedes Pixel (Sichtstrahlkalibrierung, Kap. 5.2.2) formuliert werden.

4 Standardmodelle zur Kamerakalibrierung

Das folgende Kapitel beschreibt die in der Photogrammetrie üblichen Ansätze zur Modellierung von Kameras, aufgeteilt in die mathematischen Beziehungen zur Beschreibung der dreidimensionalen projektiven Abbildung sowie in die Standardfunktionen zur Beschreibung von typischen Abbildungsfehlern.

Die rechnerische Bestimmung von Parametern der inneren und der äußeren Orientierung durch Verfahren der Bündelausgleichung, des räumlichen Rückwärtsschnittes oder der projektiven Geometrie wird an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt und kann der einschlägigen Literatur entnommen werden. Schwerpunkt dieses Kapitels ist die Diskussion der üblichen, in der Praxis eingesetzten Abbildungsmodelle und die Wirkung einzelner Parameter auf das Kameramodell.

Spezialfälle und erweiterte Verfahren der Kameramodellierung werden in Kap. 5 behandelt.

4.1 Zentralprojektion im Raum

4.1.1 Koordinatensysteme

Die photogrammetrische Kameramodellierung erfordert zunächst die Definition geeigneter Koordinatensysteme im Bild- und Objektraum (Abb. 4.1):

- Objektkoordinatensystem X,Y,Z
- Lokales Objektkoordinatensystem X^*,Y^*,Z^*
- Kamerakoordinatensystem x',y',z'
- Bildkoordinatensystem x',y'
- Sensorkoordinatensystem u,v

Die einzelnen Koordinatensysteme werden durch geeignete Transformationen miteinander verknüpft (Abb. 4.2). Ziel ist es dabei letztendlich, ein System von Abbildungsgleichungen zu entwickeln, mit dem die gesuchte Information im Zielkoordinatensystem (i.d.R. Objektkoordinatensystem) zurück ins Sensorkoordinatensystem transformiert werden kann. Die Abbildung von Sensorkoordinaten in den Objektraum ist dagegen nicht zwingend gegeben, da sie in der Regel mehrdeutig ist.

Die Bestimmung der einzelnen Transformationen geschieht im Rahmen der photogrammetrischen Kalibrierung und Orientierung. Die daraus bestimmten Parameter können je nach Messsystem und Anwendung kurz- oder langzeitlichen Variationen unterworfen sein und müssen entsprechend in geeigneten zeitlichen Intervallen aktualisiert werden.

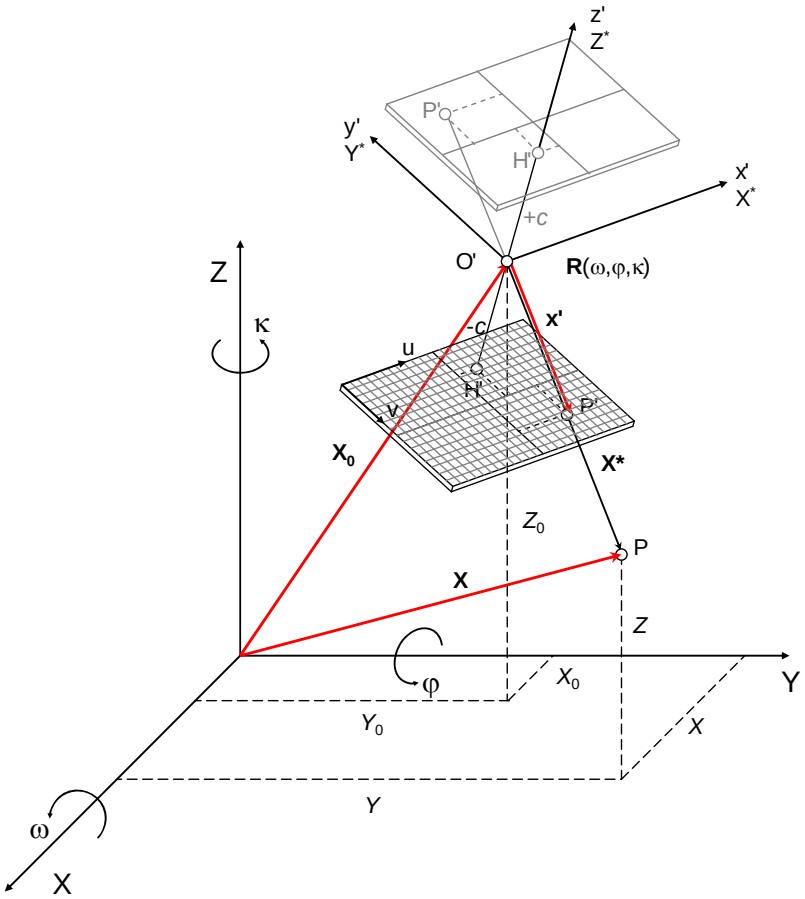


Abb. 4.1: Photogrammetrische Koordinatensysteme und räumliche projektive Abbildung

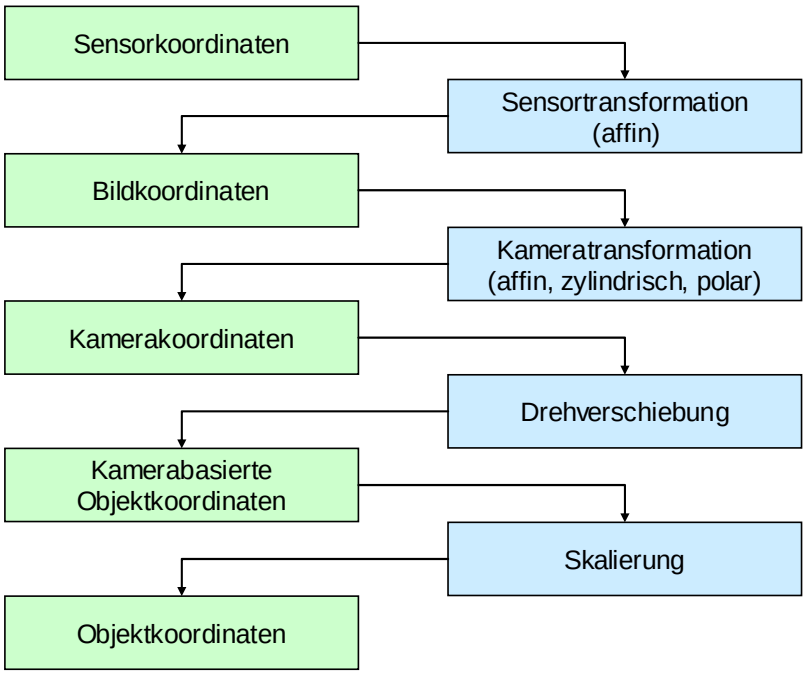


Abb. 4.2: Photogrammetrische Koordinatensysteme und Transformationen

4.1.2 Photogrammetrische Abbildungsgleichungen

Die photogrammetrischen Abbildungsgleichungen lassen sich aus Abb. 4.1 herleiten (Luhmann 2003). Die Koordinaten des Punktes P können mit der vektoriellen Beziehung

$$\mathbf{X} = \mathbf{X_0} + m\mathbf{R}\mathbf{x}' \tag{4.1}$$

dargestellt werden. Die Umkehrung der Gleichung ergibt:

$$\mathbf{x}' = \frac{1}{m}\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{X} - \mathbf{X_0}) \tag{4.2}$$

Aus dieser Transformation zwischen Objekt- und Bildkoordinaten leiten sich die Kollinearitätsgleichungen ab:

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 + z' \cdot \frac{r_{11}\cdot(X - X_0) + r_{21}\cdot(Y - Y_0) + r_{31}\cdot(Z - Z_0)}{r_{13}\cdot(X - X_0) + r_{23}\cdot(Y - Y_0) + r_{33}\cdot(Z - Z_0)} + \Delta x' \\ y' &= y'_0 + z' \cdot \frac{r_{12}\cdot(X - X_0) + r_{22}\cdot(Y - Y_0) + r_{32}\cdot(Z - Z_0)}{r_{13}\cdot(X - X_0) + r_{23}\cdot(Y - Y_0) + r_{33}\cdot(Z - Z_0)} + \Delta y' \end{aligned} \tag{4.3}$$

Die Kollinearitätsgleichungen sind nicht linear. Sie beschreiben die Abbildung eines Objektpunktes mit dem Koordinaten X,Y,Z in Bildkoordinaten $x'y'$ unter Berücksichtigung der Parameter der inneren und äußeren Orientierung. Hierbei wird in der Regel $z'=-c$ gesetzt, wenn eine für alle Bildpunkte einheitliche Kamerakonstante angenommen werden kann. Bei variabler oder instabiler Kamerakonstante lässt sich z' als bildvariante Größe auffassen und entsprechend modellieren (vgl. Kap. 1.3 und Kap. 5.3). Die Terme $\Delta x', \Delta y'$ fassen sämtliche Abbildungsfehler zusammen, die sich als Korrekturen der Bildkoordinaten darstellen lassen.

Die Kollinearitätsgleichungen können unmittelbar als Beobachtungsgleichungen eines Ausgleichungsmodells nach vermittelnden Beobachtungen eingesetzt werden und haben daher fundamentale Bedeutung für die photogrammetrischen Grundaufgaben des räumlichen Vorwärtsschnittes, des räumlichen Rückwärtsschnittes, der Kernlinienberechnung und der Bündelausgleichung. Weiterhin bilden sie die funktionale Grundlage für Orthophotoberechnungen, 3D-Visualisierungen, Steuerung von räumlichen Stereomessmarken und Bildzuordnungsverfahren zur Oberflächenerfassung (matching).

Entspricht das Aufnahmesystem nicht dem zentralperspektiven Modell, können die Kollinearitätsgleichungen angepasst werden. Dies geschieht z.B. für die Abbildung in Panoramakameras oder Zeilensensorkameras, bei denen in keiner oder nur in einer Richtung eine zentralperspektive Abbildung vorliegt (Schneider 2008).

4.1.3 Lineare Abbildungsmodelle

4.1.3.1 Direkte Lineare Transformation

Mit dem Ansatz der *Direkten Linearen Transformation* (DLT) gelingt es, die Orientierungsdaten eines Bildes ohne Näherungswerte in einem linearen Gleichungssystem zu bestimmen (Abdel-Aziz & Karara 1971). Das Verfahren basiert auf den Kollinearitätsgleichungen, die um eine Affintransformation der Bildkoordinaten erweitert werden. Es benötigt keine Informationen über ein kamerafestes Bildkoordinatensystem.

Die Transformationsgleichung für die DLT lautet:

$$x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$
$$y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \tag{4.4}$$

Dabei stellen x und y die gemessenen Komparator- oder auch Bildkoordinaten dar. X,Y,Z sind 3D-Koordinaten von Passpunkten. Die Koeffizienten L_1 bis L_{11} sind die zu bestimmenden DLT-Parameter, aus denen die Parameter der inneren (3) und äußeren Orientierung (6) abgeleitet werden können (Übersichten in McGlone et al. 1989, Mikhail et al. 2001). Die beiden übrig bleibenden Bestimmungselemente sind Scherung und Maßstabsfaktor einer Affintransformation. Durch Umstellung der Gleichung (4.4) wird folgendes lineares System aufgestellt:

$$L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4 - x L_9 X - x L_{10} Y - x L_{11} Z - x = 0$$
$$L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8 - y L_9 X - y L_{10} Y - y L_{11} Z - y = 0 \tag{4.5}$$

Aufgrund der an die gemessenen Bildkoordinaten angebrachten Affintransformation ist kein durch kamerafeste Bezugspunkte definiertes Bildkoordinatensystem erforderlich. Mit der DLT können also z.B. direkt die gemessenen Bildkoordinaten (allgemein: Koordinaten eines beliebigen Bildmesssystems mit nicht-rechtwinkligen Achsen unterschiedlichen Maßstabes, z.B. auch Pixelkoordinaten) verwendet werden, so dass auch Aufnahmen von Kameras ohne Bildkoordinatensystem und ohne bekannte innere Orientierung (z.B. Amateurkameras) direkt auswertbar sind.

Aus den DLT-Parametern lassen sich dann die bekannten Orientierungsgrößen wie folgt ableiten:

Mit

$$L = \frac{-1}{\sqrt{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}}$$

folgen die Parameter der inneren Orientierung

$$x'_0 = L^2 \cdot (L_1 \cdot L_9 + L_2 \cdot L_{10} + L_3 \cdot L_{11})$$
$$y'_0 = L^2 \cdot (L_5 \cdot L_9 + L_6 \cdot L_{10} + L_7 \cdot L_{11})$$

: Koordinaten des Bildhauptpunktes (4.6)

$$c_x = \sqrt{L^2 \cdot (L_1^2 + L_2^2 + L_3^2) - x'^2_0}$$
$$c_y = \sqrt{L^2 \cdot (L_5^2 + L_6^2 + L_7^2) - y'^2_0}$$

: Kamerakonstante (affin skaliert in x und y)

sowie die Parameter der äußeren Orientierung mit den Elementen der Rotationsmatrix **R**

$$r_{11} = \frac{L \cdot (x'_0 \cdot L_9 - L_1)}{c_x} \qquad r_{12} = \frac{L \cdot (y'_0 \cdot L_9 - L_5)}{c_y} \qquad r_{13} = L \cdot L_9$$
$$r_{21} = \frac{L \cdot (x'_0 \cdot L_{10} - L_2)}{c_x} \qquad r_{22} = \frac{L \cdot (y'_0 \cdot L_{10} - L_6)}{c_y} \qquad r_{23} = L \cdot L_{10} \tag{4.7}$$
$$r_{31} = \frac{L \cdot (x'_0 \cdot L_{11} - L_3)}{c_x} \qquad r_{32} = \frac{L \cdot (y'_0 \cdot L_{11} - L_7)}{c_y} \qquad r_{33} = L \cdot L_{11}$$

und die Lage des Projektionszentrums

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} L_4 \\ L_8 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

Die Elemente der Rotationsmatrix müssen eventuell aufgrund von möglichen Rechenunschärfen auf eine orthonormale Matrix normiert werden. Der Ansatz der DLT kann noch durch Korrekturterme für die radialsymmetrische Verzeichnung erweitert werden.

4.1.3.2 Perspektivische Projektionsmatrix

Die Abbildung eines Objektpunktes in einen Bildpunkt kann auch mit Hilfe der projektiven Geometrie formuliert werden. Dazu werden Objekt- und Bildkoordinaten als homogene Vektoren[1] geschrieben. Die Objektkoordinaten $\boldsymbol{X}$ werden durch eine 3x4-Projektionsmatrix $\boldsymbol{P}$ in den Bildraum mit den Koordinaten $\boldsymbol{x'}$ transformiert.

$$\boldsymbol{x'} = \boldsymbol{PX} \tag{4.9}$$

mit

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{KR} \cdot \left[\boldsymbol{I} \mid -\boldsymbol{X_0}\right] \tag{4.10}$$

$\boldsymbol{P}$ setzt sich dabei zusammen aus den Parametern der äußeren Orientierung $\boldsymbol{R}$ und $\boldsymbol{X_0}$ und einer Kalibriermatrix $\boldsymbol{K}$, welche fünf Parameter der inneren Orientierung enthält.

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} 1 & s' & x'_0 \\ 0 & 1+m' & y'_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c & 0 & 0 \\ 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & cs' & x'_0 \\ 0 & c(1+m') & y'_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.11}$$

Neben den Koordinaten des Projektionszentrums (x'_0, y'_0, c) sind mit s' und m' zwei Parameter enthalten, die Scherungen und Maßstabsunterschiede der Bildkoordinatenachsen beschreiben.

Zusammen mit den sechs Parametern der äußeren Orientierung enthält $\boldsymbol{P}$ also 11 unabhängige Transformationsparameter. Sie können in einem linearen Gleichungssystem gelöst und in die 11 Parameter der DLT überführt werden (Brandstätter 2001).

Ausformuliert ergibt Gl. (4.10) folgendes System:

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} c & cs' & x'_0 \\ 0 & c(1+m') & y'_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & -X_0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z_0 \end{array}\right] \tag{4.12}$$

$$\boldsymbol{x'} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & cs' & x'_0 \\ 0 & c(1+m') & y'_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & -X_0 \\ 0 & 1 & 0 & -Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & -Z_0 \end{array}\right] \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

[1] Matrizen und Vektoren für homogene Koordinaten werden im Folgenden fett und kursiv dargestellt.

Damit zeigt Gl. (4.13) von rechts aus zunächst eine Translation zum Projektionszentrum, anschließend die Rotation um **R** und schließlich die perspektive Skalierung und Hauptpunktkorrektur im Bildraum.

Die Berücksichtigung von Verzeichnungseffekten geschieht im obigen Modell durch Hinzufügen ortsabhängiger Korrekturen $\Delta x', \Delta y'$:

$$\boldsymbol{K'} = \begin{bmatrix} c & cs' & x'_0 + \Delta x' \\ 0 & c(1+m') & y'_0 + \Delta y' \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta x' \\ 0 & 1 & \Delta y' \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c & cs' & x'_0 \\ 0 & c(1+m') & y'_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

4.2 Bildfehler beschreibende Funktionen

Abweichungen von der idealen zentralperspektiven Abbildung werden durch Korrekturfunktionen $\Delta x'$, $\Delta y'$ der Bildkoordinaten ausgedrückt. Nach Kap. 3.3.1 ist die Verzeichnung auf den Bildhauptpunkt bezogen, d.h. die gemessenen Bildkoordinaten x'_P, y'_P werden zunächst um die Koordinaten des Bildhauptpunktes x'_0, y'_0 korrigiert:

$$\begin{aligned} x^\circ &= x'_P - x'_0 \\ y^\circ &= y'_P - y'_0 \\ \text{mit} & \\ r' &= \sqrt{x^{\circ 2} + y^{\circ 2}} \end{aligned} \quad \begin{aligned} &\text{: auf den Hauptpunkt bezogene Bildkoordinaten} \\ & \\ &\text{: Bildradius, Abstand vom Bildhauptpunkt} \end{aligned} \tag{4.15}$$

Die Korrektur der Bildkoordinaten x°, y° erfolgt dann durch:

$$\begin{aligned} x' &= x^\circ - \Delta x' \\ y' &= y^\circ - \Delta y' \end{aligned} \quad \text{: korrigierte Bildkoordinaten} \tag{4.16}$$

Die Werte x°, y° stellen streng genommen nur Näherungswerte dar, da die Korrekturen $\Delta x'$, $\Delta y'$ mit den endgültigen Bildkoordinaten x', y' berechnet werden müssen. Größere Korrekturwerte müssen daher iterativ angebracht werden (siehe Kap. 4.2.4).

$$\begin{aligned} x^\circ &= x' + \Delta x' \\ y^\circ &= y' + \Delta y' \end{aligned} \quad \text{: verzeichnete Bildkoordinaten} \tag{4.17}$$

Die Umkehrung von Gl. (4.17) erlaubt die direkte, nicht iterative Berechnung verzeichneter Bildkoordinaten.

4.2.1 Radial-symmetrische Verzeichnung

4.2.1.1 Standardparameter der Photogrammetrie

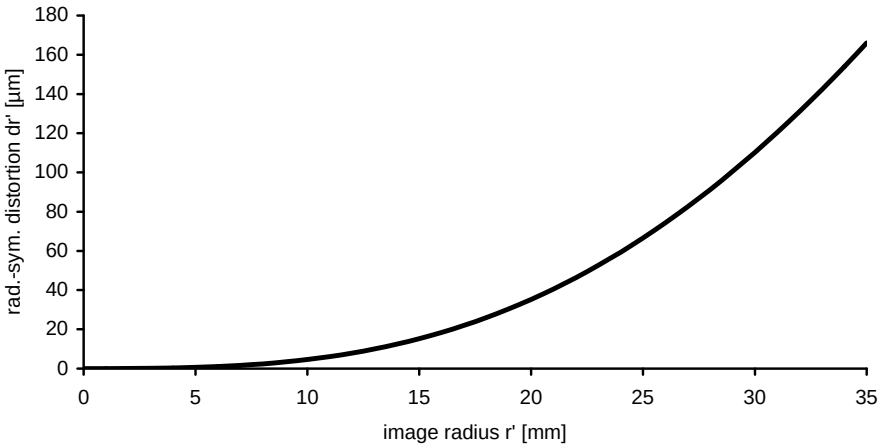


Abb. 4.3: Radial-symmetrische Verzeichnung

Abb. 4.3 zeigt den Effekt der radial-symmetrischen Verzeichnung in Abhängigkeit vom Bildradius eines Bildpunktes. Sie wächst mit zunehmendem Abstand vom Bildhauptpunkt an und kann für handelsübliche Objektive leicht über 100 µm in den Bildecken betragen. Die Verzeichnungskurve wird üblicherweise in Form einer Reihenentwicklung (Seidel-Reihe) mit Verzeichnungsparametern A_1 bis A_n ausgedrückt (Brown 1971), die an radiale Abstandsterme ungerader Potenzen angebracht werden (Pérez 1996):

$$\Delta r'_{rad} = A_1 r'^3 + A_2 r'^5 + A_3 r'^7 + \ldots \tag{4.18}$$

Sie kann für die meisten Objektive nach dem zweiten oder dritten Term abgebrochen werden. Die Korrektur der Bildkoordinaten erfolgt dann proportional nach:

$$\Delta x'_{rad} = x' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'} \qquad \Delta y'_{rad} = y' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'} \tag{4.19}$$

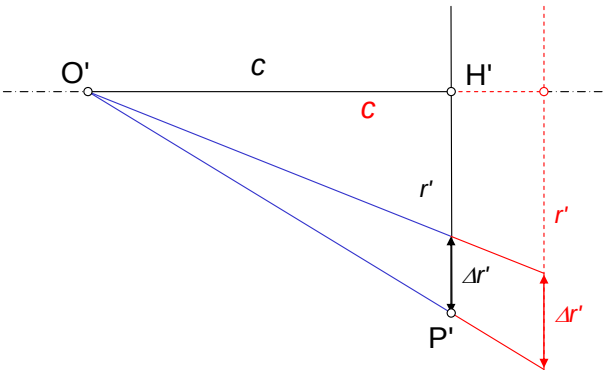


Abb. 4.4: Lineare Abhängigkeit zwischen c *und* Δr'

Die Parameter der Verzeichnungsfunktion nach (4.18) sind numerisch korreliert mit dem Bildmaßstab bzw. der Kamerakonstanten (siehe Gl. 3.17 und Abb. 4.4). Zur Vermeidung dieser Korrelationen wird ein linearer Anteil der Verzeichnungsfunktion abgespalten, wodurch die Verzeichnungskurve quasi in Richtung der r'-Achse gedreht wird und einen zweiten Nulldurchgang erhält (Abb. 4.5).

$$\Delta r'_{rad} = K_0 r' + K_1 r'^3 + K_2 r'^5 + K_3 r'^7 \tag{4.20}$$

Alternativ wird auch ein Polynomansatz der folgenden Form verwendet:

$$\Delta r'_{rad} = A_1 r'(r'^2 - r_0^2) + A_2 r'(r'^4 - r_0^4) + A_3 r'(r'^6 - r_0^6) \tag{4.21}$$

Durch einfache Umformung von (4.21) lässt sich zeigen, dass die gleiche Wirkung wie mit Gleichung (4.20) erreicht wird:

$$\Delta r'_{rad} = A_1 r'^3 + A_2 r'^5 + A_3 r'^7 - r'(A_1 r_0^2 + A_2 r_0^4 + A_3 r_0^6) \tag{4.22}$$

Dabei stellt der Klammerausdruck eine konstante Größe analog zu K_0 dar. Allerdings ist die Wahl von r_0 nicht beliebig, da eine Abhängigkeit zu den Parametern A_1, A_2, A_3 besteht. In der Praxis sollte r_0 so gelegt werden, dass die minimalen und maximalen Verzeichnungswerte des genutzten Bildformates etwa gleich groß werden (*balanced radial distortion*, Fryer 1996). In der Regel liegt r_0 etwa bei 2/3 des maximalen Bildradius.

Abb. 4.5 zeigt eine typische Kurve der radial-symmetrischen Verzeichnung nach (4.21), Abb. 4.6 zeigt die entsprechende Auswirkung flächenhaft im Bildformat.

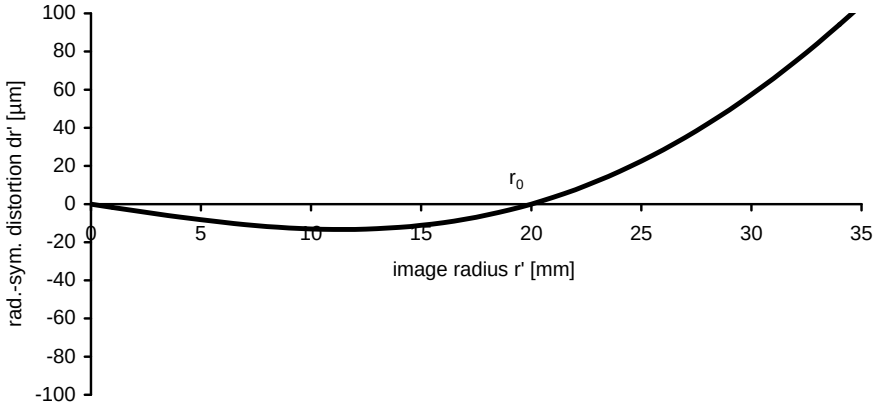
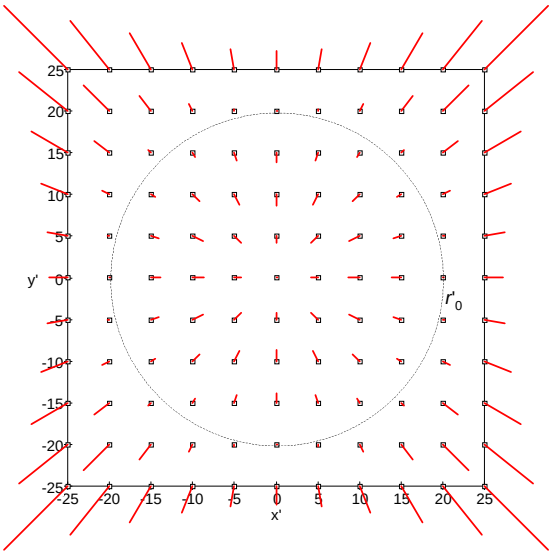


Abb. 4.5: Verzeichnungskurve mit zweitem Nulldurchgang (Rollei Sonnar 4/150)



Verzeichnungsparameter:

$A_1 = 4.664 \cdot 10^{-6}$
$A_2 = -6.456 \cdot 10^{-10}$
$A_3 = 0$

$r_0 = 20.0$ mm

Abb. 4.6: Flächenhafte Darstellung der radial-symmetrischen Verzeichnung (Rollei Sonnar 4/150)

Interpretation der Verzeichnungskoeffizienten

Wenn Parameter A_1 gegenüber den anderen Verzeichnungsparametern dominant ist, bestimmt er mit seinem Vorzeichen die Form der Verzeichnung als tonnenförmige ($A_1 < 0$) oder kissenförmige ($A_1 > 0$) Figur (Abb. 4.7).

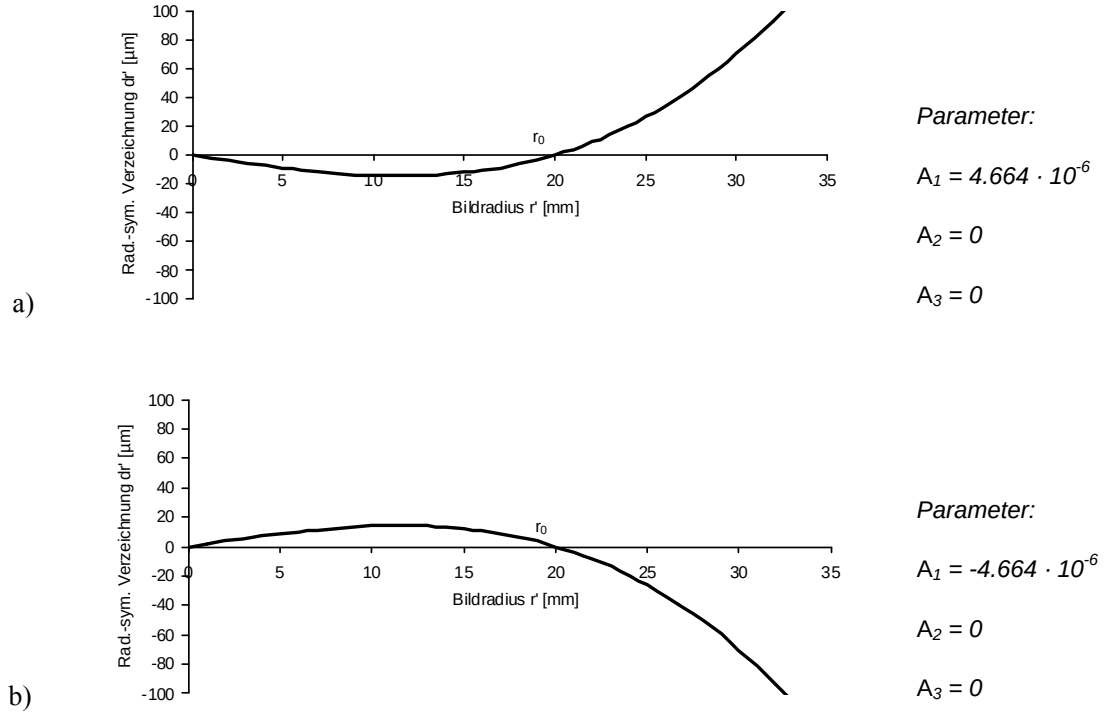


Abb. 4.7: Auswirkung eines Vorzeichenwechsels bei A_1

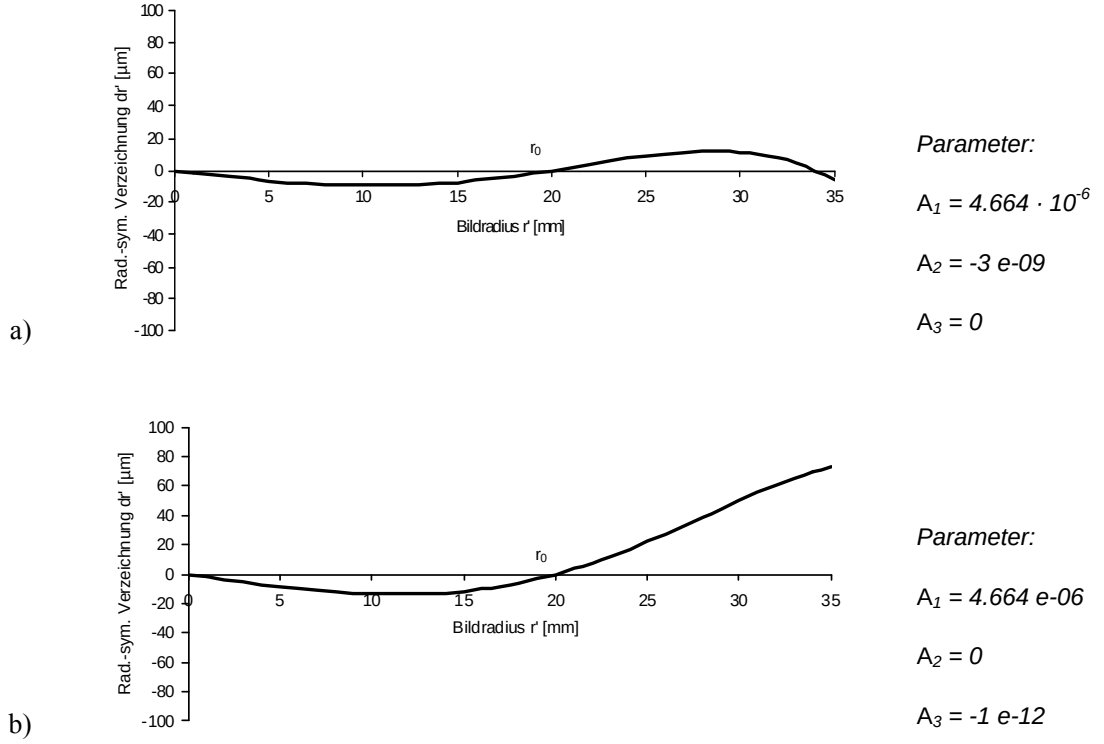


Abb. 4.8: Auswirkungen der Parameter A_2 *und* A_3

A_2 und A_3 modellieren Abweichungen der Verzeichnungskurve von der kubischen Parabelform. A_2 wirkt üblicherweise primär zum Bildrand hin (Abb. 4.8a). Durch Einführung von A_3 gelingt es auch Objektive mit großen Verzeichnungswerten, die insbesondere an den Bildrändern auftreten, noch hinreichend zu modellieren (Abb. 4.8b). Fisheye-Objektive mit Öffnungswinkeln bis 180° und darüber müssen jedoch durch alternative Parametrisierungen modelliert werden, die in Kap. 5.4 detailliert besprochen werden.

4.2.1.2 Alternative Verzeichnungsansätze

Aus dem weiteren Umfeld von Computer Vision und Robotik wurden in den achtziger Jahren einfachere Ansätze zur Beschreibung der radial-symmetrischen Verzeichnung favorisiert. Im Ansatz von Tsai und Lenz (Tsai 1986, Lenz 1987) wird neben Kamerakonstante, Bildhauptpunkt und zwei Skalierungsparametern für x'- und y'-Bildkoordinatenachsen nur ein Parameter k für die radial-symmetrische Verzeichnung eingeführt. Die verzeichneten, auf den Hauptpunkt bezogenen Bildkoordinaten werden berechnet nach

$$\begin{aligned} x^\circ &= \frac{2x'}{1+\sqrt{1-4kr'^2}} \\ y^\circ &= \frac{2y'}{1+\sqrt{1-4kr'^2}} \end{aligned} \tag{4.23}$$

Dieser Ansatz hat große Verbreitung gefunden und findet sich beispielsweise in dem Bildverarbeitungssystem Halcon (MVTec 2007). Es ist offensichtlich, dass radial-symmetrische Verzeichnungseffekte höheren Grades nicht erfasst werden und dass damit dieser Ansatz gegenüber einem Seidelpolynom mit zwei oder drei Parametern (A_1, A_2, A_3) nicht gleichwertig ist. Typische Objektive mit größeren Verzeichnungsanteilen werden unvollständig modelliert, wobei dieser Nachteil zu den Bildrändern hin zunimmt. Zudem werden asymmetrische und tangentiale Verzeichnungseffekte gar nicht berücksichtigt. Signifikante Genauigkeitsdefizite wurden durch Frost (2008) nachgewiesen.

Lehrbücher aus dem Bereich Computer Vision behandeln radial-symmetrische Verzeichnung inzwischen analog zur Photogrammetrie, wobei in der Regel zwei Parameter der Reihenentwicklung bevorzugt werden. Klette et al. (1996) empfehlen die Verzeichnungsfunktion nach Gl. (4.18), sprechen dabei jedoch unpräzise von Linsenverzerrungen. Hartley & Zisserman (2000) empfehlen ein Polynom der Form

$$L(r') = 1 + k_1 r' + k_2 r'^2 + k_3 r'^3 + k_4 r'^4 + \ldots \tag{4.24}$$

das an die gemessenen Bildkoordinaten wie folgt angebracht wird:

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 + L(r')(x'_P - x'_0) \\ y' &= y'_0 + L(r')(y'_P - y'_0) \end{aligned} \tag{4.25}$$

Hier werden auch gerade Potenzen der Reihenentwicklungen aufgenommen, die zum einen physikalisch nicht begründet sind (siehe Kap. 4.2.1.1 sowie Pérez 1996), zum anderen mit der quadratischen Funktion zur Beschreibung der tangentialen Verzeichnung korreliert sein dürften.

Die Formulierung der radialen Verzeichnungsfunktion wird im Regelfall auf den Bildhauptpunkt bezogen (siehe Gl. 4.15 und 4.16), wobei Identität zwischen Symmetriepunkt und Autokollimationspunkt angenommen wird (vgl. Kap. 3.2.4.1). Für Kamera-Objektiv-Kombinationen mit stark geneigten Bildebenen oder starker Dezentrierung der Linsen fallen Bildhauptpunkt und Symmetriepunkt nicht mehr zusammen. In diesem Fall ist es möglich, den Symmetriepunkt als Bezugspunkt der radial-symmetrischen Verzeichnung getrennt vom Bildhauptpunkt einzuführen und im Rahmen einer Bündelausgleichung mitzubestimmen. Ein Beispiel dazu wird in Kap. 6.3 diskutiert.

4.2.2 Tangentiale und asymmetrische Verzeichnung

Die *radial-asymmetrische* und *tangentiale Verzeichnung* wird vor allem durch Dezentrierung der Linsen im Objektiv verursacht (Kap. 3.3.2). Ihr Anteil kann durch folgenden Ansatz erfasst werden (Brown 1971):

$$\begin{aligned} \Delta x'_{tan} &= B_1(r'^2 + 2x'^2) + 2B_2 x' y' \\ \Delta y'_{tan} &= B_2(r'^2 + 2y'^2) + 2B_1 x' y' \end{aligned} \tag{4.26}$$

Der Anteil ist gegenüber der radial-symmetrischen Verzeichnung für die meisten Qualitätsobjektive deutlich geringer und wird häufig nur bei hohen Genauigkeitsanforderungen mitbestimmt. Bei Verwendung einfacher Objektive, wie sie oft bei Videokameras zu finden sind, sollte die radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung auf jeden Fall mitbestimmt werden.

4.2.3 Sensorparameter

Affinität und *Scherung* beschreiben Abweichungen des Bildkoordinatensystems von Orthogonalität und Gleichmaßstäbigkeit der Koordinatenachsen. Die Effekte werden bei analogen Kameras direkt durch eine Affintransformation auf die Rahmenmarken oder ein Réseau kompensiert. Digitale Aufnahmesysteme können diese Charakteristik durch eine ungleichmäßige Anordnung der Sensorelemente aufweisen. Auch bei der Auswertung von Videobildern, die mit einem Frame Grabber digitalisiert worden sind, treten Affinität und Scherung auf. Zur Kompensation kann folgender Ansatz verwendet werden (El-Hakim 1986):

$$\begin{aligned} \Delta x'_{aff} &= C_1 x' + C_2 y' \\ \Delta y'_{aff} &= 0 \end{aligned} \tag{4.27}$$

Der Parameter C_1 wirkt dabei als Skalierungsfaktor der x'-Koordinaten analog zum Faktor s' in den Gleichungen (4.10) bis (4.13).

Für analoge Aufnahmesysteme mit Film als Bildsensor werden Affinität und Scherung, hervorgerufen z.B. durch Filmschrumpf, in der Regel durch Transformation der Rahmenmarken oder Messung eines Réseaus kompensiert. Rahmenmarken oder Réseau erlauben auch weitere globale bzw. lokale affine Bildkorrekturen, z.B. wenn analoge Bilder in Bildscannern digitalisiert werden und dabei zusätzliche Bilddeformationen auftreten.

4.2.4 Korrektur der Bildkoordinaten

Zusammengefasst beschreiben die einzelnen Terme die üblicherweise auftretenden Abbildungseffekte photogrammetrischer Aufnahmesysteme:

$$\begin{aligned} \Delta x' &= \Delta x'_{rad} + \Delta x'_{tan} + \Delta x'_{aff} \\ \Delta y' &= \Delta y'_{rad} + \Delta y'_{tan} + \Delta y'_{aff} \end{aligned} \tag{4.28}$$

Ist die innere Orientierung einer Kamera bekannt, können gemessene Bildpunkte vorab verzeichnungskorrigiert werden. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn Objektkoordinaten mittels Vorwärtsschnitts ermittelt oder verzeichnungsfreie Bilder berechnet werden sollen. Bei der rechnerischen Korrektur der Bildfehler kommt es häufig zu Unklarheiten über deren Reihenfolge und Vorzeichen. Zur eindeutigen Definition ist es notwendig, Herkunft der

Verzeichnungswerte sowie die Implementierung des verwendeten Programms genau zu kennen, was in der Praxis häufig nicht möglich ist.

Das in den Formeln (4.28) beschriebene Korrekturmodell basiert auf der Annahme, dass die Korrekturwerte im Rahmen einer Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung gewonnen werden. Das dort verwendete mathematische Modell der Kollinearitätsgleichungen (Gl. 4.3) geht vom Objektraum aus und berechnet Bildkoordinaten, an die etwaige Verzeichnungskorrekturen angebracht werden.

$$\begin{aligned} x' &= f(X, Y, Z, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, c, x'_0) + \Delta x'(x', y') \\ y' &= f(X, Y, Z, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, c, y'_0) + \Delta y'(x', y') \end{aligned} \tag{4.29}$$

Die Korrekturwerte hängen also vom aktuellen Wert der Bildkoordinaten selbst ab und können daher erst nach hinreichend vielen Iterationen korrekt berechnet werden. Nach der Ausgleichung liegen demnach solche Korrekturparameter vor, die sich auf ausgeglichene Objektkoordinaten und Orientierungsparameter beziehen, oder anders ausgedrückt, auf „fehlerfreie“ Bildkoordinaten. Für alle Berechnungen, die vom Objektraum in den Bildraum führen, können diese Korrekturparameter also unmittelbar an die über die Kollinearitätsgleichungen ermittelten Bildkoordinaten angebracht werden.

Für den Fall, dass in einem verzeichneten Bild gemessene Bildkoordinaten durch vorab ermittelte Verzeichnungsparameter korrigiert werden sollen, muss die Korrektur iterativ angesetzt werden, wobei die jeweils korrigierte Bildposition Ausgangspunkt für die nachfolgende Berechnung der Korrekturwerte sein muss.

Für Objektive mit üblichen Verzeichnungswerten konvergiert das Verfahren schnell und führt nach 2 bis 3 Iterationen bereits zu einem stabilen Ergebnis (Abb. 4.10a). Objektive mit großen Verzeichnungswerten, wie sie bei starken Weitwinkelobjektiven auftreten können (Beispiel in Abb. 4.9), führen unter Umständen zu einem schwach oder nicht konvergierenden System, besonders bei der Korrektur von Bildkoordinaten in den Ecken des Bildes (Abb. 4.10b). Hier muss gegebenenfalls die Iteration abgebrochen oder auf die Auswertung der Bildrandbereiche verzichtet werden.

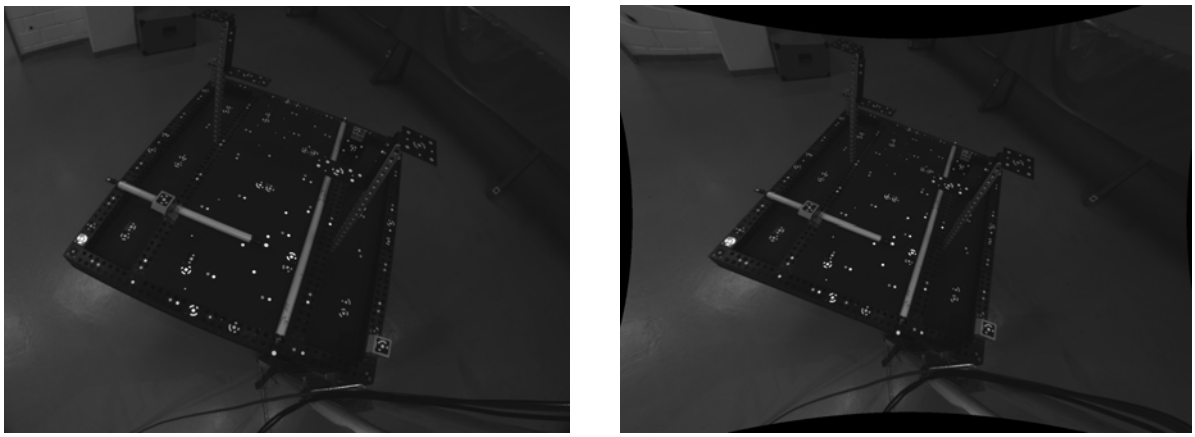


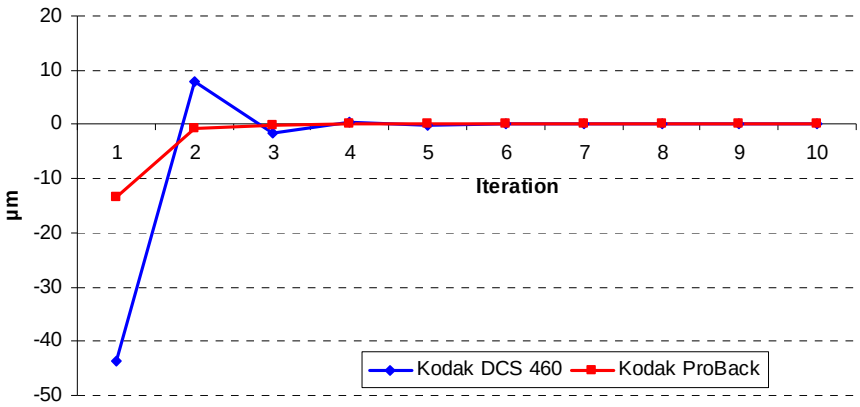
Abb. 4.9: Beispiel eines stark verzeichneten Bildes und verzeichnungskorrigiertes Bild

Die rekursive Korrektur von Bildkoordinaten spielt in der Praxis vor allem dann eine Rolle, wenn Objektive mit größeren Verzeichnungswerten verwendet werden. Tab. 4.1 stellt die Auswirkung auf die Bildkoordinaten für typische Aufnahmesysteme dar, wenn keine iterative Bildkoordinatenkorrektur angebracht wird. Hierbei wird deutlich, dass bei Kameras mit größerem Bildwinkel und hohen Verzeichnungswerten nicht zu vernachlässigende Fehler auftreten, wenn nicht iterativ korrigiert wird (DCS 645M: 13.5 µm, DCS 460: 42.3 µm). Für Kameras mit verzeichnungsarmen Objektiven (Rollei Sonnar 4/150) bzw. sehr kleinem Bildwinkel (JAI CCD-Videokamera) kann dagegen ohne Iterationen korrigiert werden (Rollei 6008: 0.8 µm, JAI: 0.2 µm). Liegt ein stark verzeichnen-

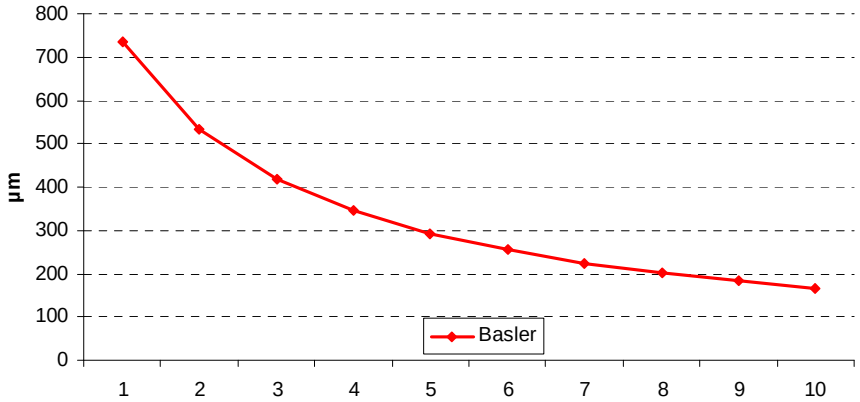
des Objektiv vor (Basler-Kamera mit Objektiv Pentax 4.8mm, Beispielbild in Abb. 4.9), sind zum einen die Korrekturbeträge sehr hoch (hier 238 µm), zum anderen divergiert die Korrektur in den Bildecken.

Kamera	**Rollei 6008**	**Kodak DCS 645M**	**Kodak DCS 460**	**JAI**	**Basler**
Objektiv	f=150 mm	f=35 mm	f=15 mm	f=8 mm	f=4.2 mm
c	150.5566	-35.6657	14.4988	-8.2364	-4.3100
x'_0 y'_0	0.023 0.014	-0.0870 0.4020	0.1618 -0.1199	0.2477 0.0839	-0.0405 -0.0011
A_1 A_2 A_3	4.664E-06 -6.456E-10 0	-9.0439E-05 6.3340E-08 -1.5294E-11	-4.5020E-04 1.7260E-06 -4.0890E-10	-1.9016E-03 3.1632E-05 0	-1.4700E-02 3.0396E-04 3.4731E-06
B_1 B_2	0 0	2.5979E-06 -7.2654E-07	-1.4670E-06 -6.6260E-06	-2.6175E-05 -7.3739E-05	1.1358E-05 -4.5268E-05
C_1 C_2	0 0	1.0836E-04 1.0964E-05	-2.5300E-04 -1.6130E-04	9.8413E-03 -7.2607E-06	1.9833E-05 8.9119E-05
Bildkoordinate x' Bildkoordinate y'	25.000 25.000	18.000 18.000	13.000 9.000	3.200 2.400	4.400 3.300
Bildwinkel	13.21°	35.28°	47.36°	24.49°	52.08°
Gesamteffekt	0.0767	-0.2641	0.2229	-0.0211	-0.5674
Iterat. Korrektur	-0.0008	-0.0135	-0.0423	-0.0003	-0.2385

Tab. 4.1: Auswirkung der iterativen Verzeichnungskorrektur typischer Aufnahmesysteme



a) Verlauf bei normal verzeichnenden Objektiven



b) Verlauf bei stark verzeichnenden Objektiven

Abb. 4.10: Iterative Verzeichnungskorrektur

4.3 Analytische Verfahren

Der folgende Abschnitt fasst die wesentlichen Verfahren zusammen, mit denen eine Kamerakalibrierung berechnet oder im Zuge einer Einzel- oder Mehrbildorientierung mitbestimmt wird. Eine ausführliche Herleitung und Beschreibung der hier angesprochenen Verfahren, insbesondere der auf Ausgleichung basierenden Methoden, finden sich u.a. in Atkinson (1996), Luhmann (2003) und Luhmann et al. (2006).

Unterschieden wird in Verfahren zur Kalibrierung durch eine Einzelbildaufnahme und in Verfahren auf Basis einer Mehrbildkonfiguration.

4.3.1 Einzelbildverfahren

4.3.1.1 Projektive Verfahren

Die Bestimmung der Parameter der inneren und äußeren Orientierung aus einem Einzelbild durch lineare Verfahren wird in Kap. 4.1.3 erläutert (DLT, projektive Verfahren). Dabei wird die äußere Orientierung in dem durch mindestens sechs räumlich verteilte (nicht in einer gemeinsamen Ebene liegende) XYZ-Passpunkte festgelegten Koordinatensystem ermittelt. Die innere Orientierung wird durch lediglich fünf Parameter bestimmt, wobei nichtlineare Verzeichnungen nicht direkt berechnet werden können. Für Anwendungen geringerer Genauigkeit können so praktisch beliebige Aufnahmen orientiert und kalibriert werden. Für höhere Genauigkeitsforderungen sind diese Methoden als Näherungsverfahren zu betrachten oder müssen durch eine zusätzliche Verzeichnungsbestimmung ergänzt werden.

4.3.1.2 Erweiterter räumlicher Rückwärtsschritt

Der räumliche Rückwärtsschnitt dient zur Berechnung der sechs Parameter der äußeren Orientierung und wird mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen (4.3) formuliert, die im Rahmen einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten an Näherungswerten linearisiert und iterativ gelöst werden. Die notwendigen Näherungswerte, insbesondere für die im Nahbereich häufig beliebig auftretenden äußeren Orientierungen, können bei hinreichender Passpunktsituation durch die oben beschriebenen linearen Verfahren berechnet werden. Bei minimaler Passpunktkonfiguration (≥ 3) sind Näherungslösungen z.B. nach Kyle (1990) oder Rohrberg (2009) geeignet, die auf einer Suchstrategie im Tetraeder basieren, der aus drei Passpunkten und dem Projektionszentrum gebildet wird.

Wird das mathematische Modell durch Bildfehler beschreibende Funktionen erweitert ($\Delta x'$, $\Delta y'$), können die Parameter dieser Funktionen im Rahmen der Ausgleichung mitbestimmt werden. Da die Anzahl der Unbekannten sich erhöht, sind entsprechend mehr Passpunkte im Objektraum bereitzustellen. Kamerakonstante und Hauptpunktlage können theoretisch mit insgesamt fünf Passpunkten mitbestimmt werden, sind jedoch in der Regel hoch korreliert mit den Translationen der äußeren Orientierung. Verzeichnungsparameter sind nur dann signifikant berechenbar, wenn ein hinreichend dichtes, das Bildformat abdeckendes Passpunktfeld gegeben ist.

4.3.2 Mehrbildverfahren

4.3.2.1 Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung

Die Bestimmung der inneren und äußeren Orientierung von Mehrbildverbänden durch Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung ist das Standardverfahren der photogrammetrischen Kalibrierung und Orientierung. Das Verfahren wurde über inzwischen vier Jahrzehnte entwickelt und ist hinreichend dokumentiert (z.B. Brown 1976, Kruck 1983, Wester-Ebbinghaus 1985a, Hinsken 1989, Kager 1989). Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Homogenität der Ergebnisse lassen sich durch geeignete Aufnahmekonfigurationen optimieren und werden bisher von keinem anderen mathematischen Ansatz übertroffen.

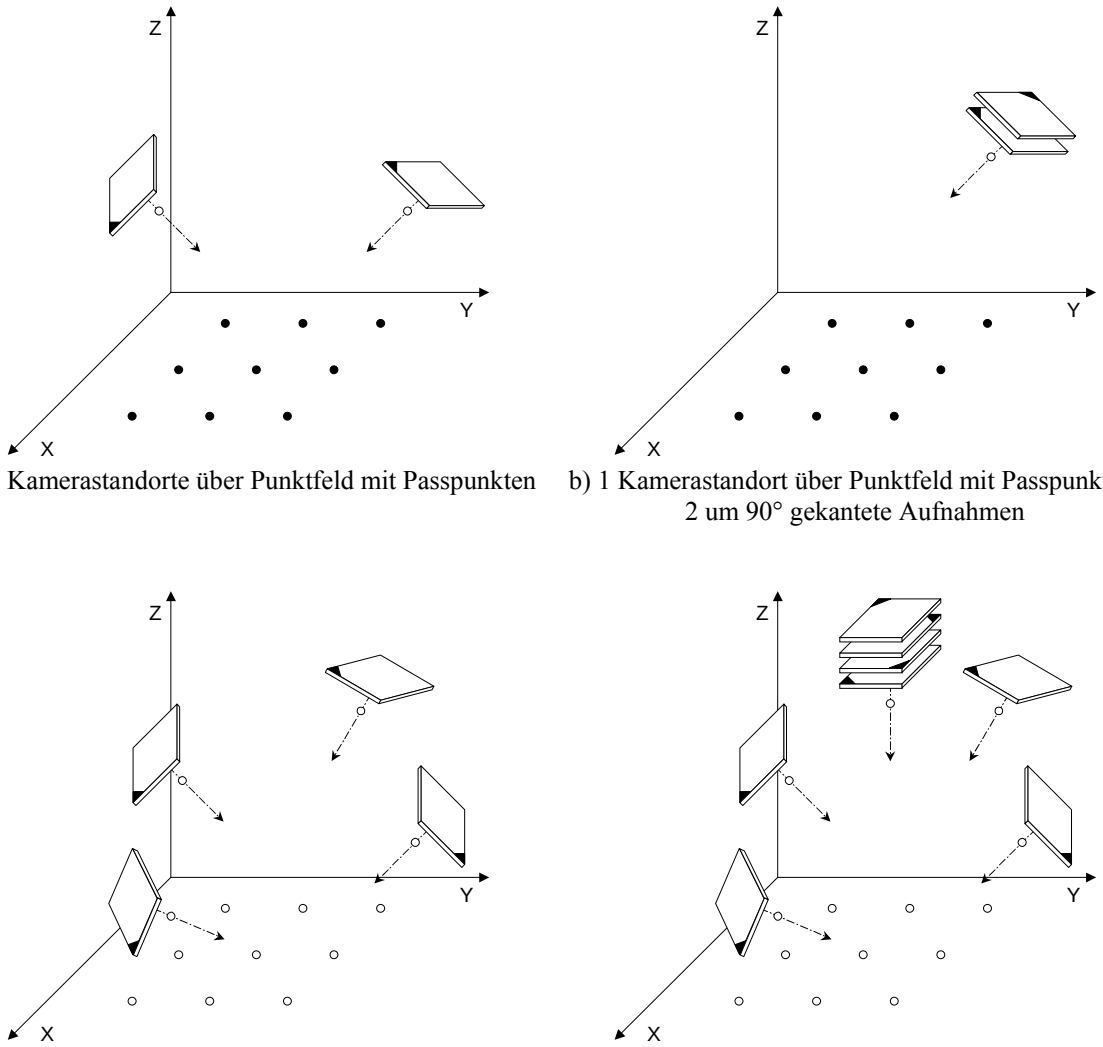
Die mathematische Grundlage wird wie im Fall des erweiterten räumlichen Rückwärtsschnittes durch die linearisierten Kollinearitätsgleichungen gebildet. Das Modell kann praktisch beliebig um z.B. folgende Funktionalitäten erweitert werden:

- Verfeinerte Modelle der optischen Abbildung,
  z.B. chromatische Aberration oder entfernungsabhängige Verzeichnung;
- Bildvariante Modellierung der inneren Orientierung,
  z.B. sensor- oder gehäusebedingte Bewegungen zwischen Projektionszentrum und Bildebene;
- Modellierung beweglicher Sensorplattformen,
  z.B. Taumeleigenschaften einer scannenden Panoramakamera oder Drifteigenschaften von Inertialmesssystemen;
- Mehrmedien,
  z.B. Übergang zwischen Luft und Wasser oder Abbildung durch optische Komponenten unterschiedlicher Brechung;
- Geometrische Bedingungen zwischen Beobachtungen und/oder Unbekannten,
  z.B. festgehaltene relative Orientierung bei Stereoaufnahmesystemen oder Geradenbedingungen (Plumbline-Kalibrierung);
- Integration zusätzlicher Beobachtungen,
  z.B. GPS- und INS-Beobachtungen oder geodätisch gemessene Richtungen;
- Integration zusätzlicher Sensoren und Komponenten,
  z.B. Drehtisch als messendes Element oder Laserlinienschnittsensoren.

Die auf Bündelausgleichung basierenden Verfahren setzen hinreichende Aufnahmekonfigurationen voraus, die für die notwendige Redundanz des Gleichungssystems und für die geometrische Bestimmbarkeit der Parameter sorgen. Durch statistische Verfahren wird dann einerseits die Erkennung und Eliminierung von groben Fehlern (Ausreißern) ermöglicht, zum anderen lassen sich Zuverlässigkeitsmaße, innere und äußere Genauigkeiten sowie Korrelationen zwischen den Unbekannten berechnen. Für Anwendungen ohne bestimmte Datumsvorgaben (z.B. Kamerakalibrierung) ist eine zwangsfreie Einpassung auf ein Objektkoordinatensystem durch freie Netzausgleichung oder minimale Systemlagerung sinnvoll. Dies ist für die Kamerakalibrierung besonders vorteilhaft, weil sich etwaige Spannungen im Passpunktfeld nicht negativ auf die zu berechnenden Kameraparameter auswirken können.

Geeignete Aufnahmekonfigurationen sind in vielfältiger Weise theoretisch und praktisch untersucht worden. Wester-Ebbinghaus (1983b, 1985b) diskutiert die wesentlichen Grundkonzepte von Aufnahmeanordnungen hinsichtlich der notwendigen Anzahl und Verteilung von Bildern, Pass- und Verknüpfungspunkten sowie Maßstabsinformationen im Objektraum unter dem Aspekt der simultanen Kamerakalibrierung. Fraser (1996) beurteilt Aufnahmekonfigurationen aufgrund ihrer Netzgeometrie mit statistisch abgeleiteten Kenngrößen (Design 0. bis 3. Ordnung), die aus Kovarianzmatrizen abgeleitet werden. Mason (1994) kombiniert statistische Qualitätsanalysen mit

Expertenwissen zur Optimierung von Aufnahmeanordnungen. Hastedt (2004) nutzt Monte-Carlo-Methoden zur Simulation von Aufnahmeverbänden und zur Analyse der Fehlerfortpflanzung. Einige typische Aufnahmekonstellationen sind in Abb. 4.11 und Abb. 4.12 zusammengefasst.



a) 2 Kamerastandorte über Punktfeld mit Passpunkten

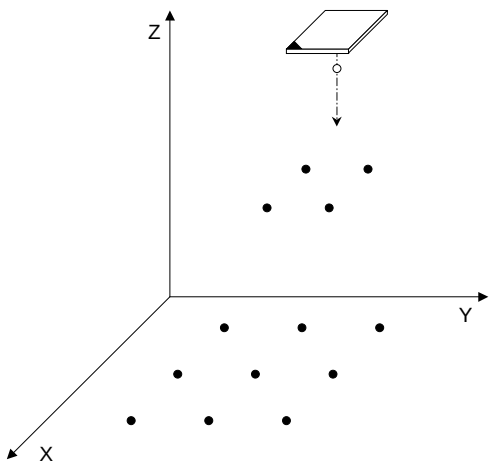
b) 1 Kamerastandort über Punktfeld mit Passpunkten, 2 um 90° gekantete Aufnahmen

c) 4 Kamerastandorte über Punktfeld ohne Passpunkte

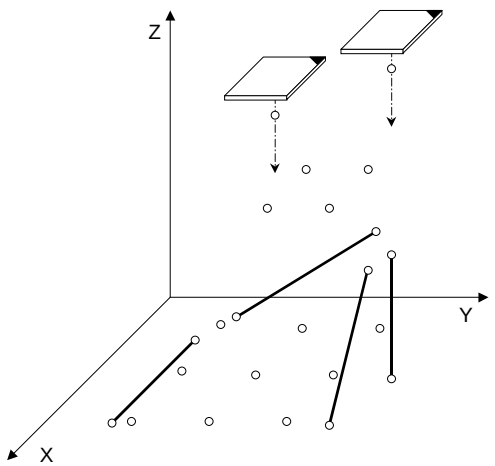
d) 8 Kamerastandorte über Punktfeld ohne Passpunkte

Abb. 4.11: Kalibrieranordnungen bei ebenem Punktfeld (Wester-Ebbinghaus 1983b, 1985b)

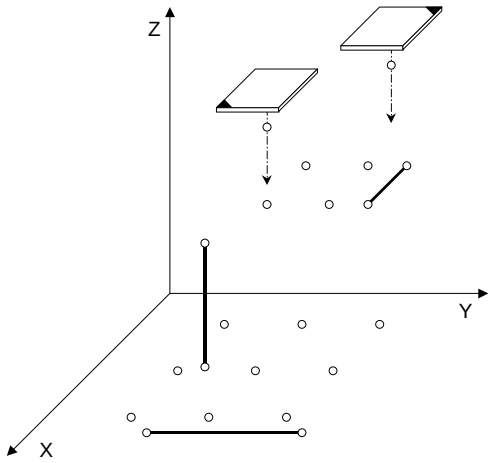
● Passpunkt ○ Zielpunkt



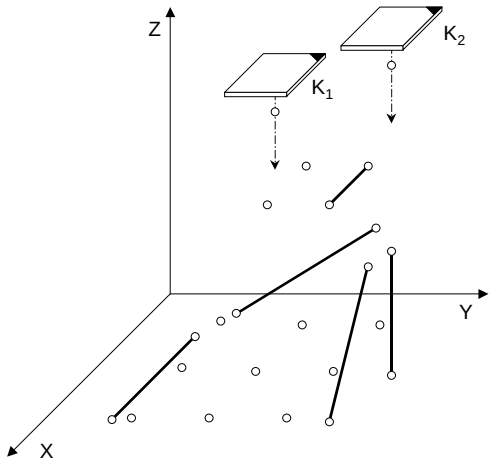
a) 1 Aufnahme über räumlichem Punktfeld mit Passpunkten



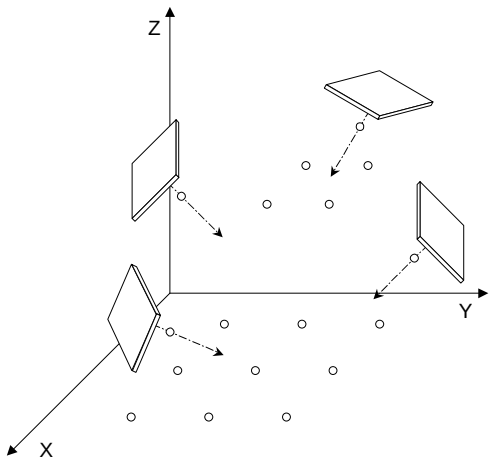
b) 2 nicht-gewälzte Aufnahmen über Punktfeld mit 4 Maßstäben ohne Passpunkte



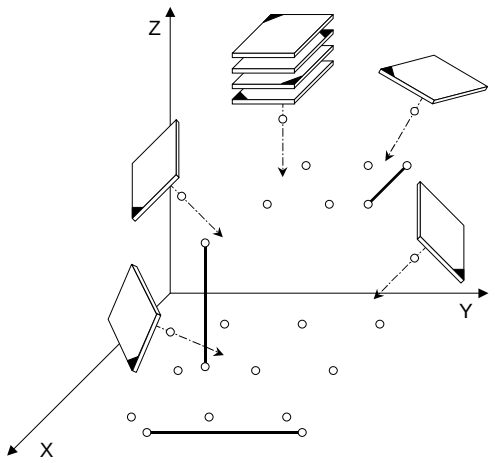
c) 2 gewälzte Aufnahmen über Punktfeld mit 3 Maßstäben ohne Passpunkte



d) 2 unterschiedliche Kameras K_1,K_2 über Punktfeld mit 5 Maßstäben ohne Passpunkte



e) 4 Kamerastandorte über räumlichem Punktfeld ohne Passpunkte, beliebige Kantungen



f) 8 Kamerastandorte über räumlichem Punktfeld mit 3 Maßstäben ohne Passpunkte

Abb. 4.12: Kalibrieranordnungen bei räumlichem Punktfeld (Wester-Ebbinghaus 1983b, 1985b)

● Passpunkt ○ Zielpunkt ○——○ bekannte Strecke

Die für die Bestimmung der Kamerakonstanten stets notwendige Maßstabsinformation in Aufnahmerichtung kann bei ebenen Testfeldern durch Einführung von Schrägaufnahmen gewonnen werden. Die Bestimmbarkeit der Hauptpunktlage wird durch zusätzliche gewälzte, also um die Aufnahmeachse gedrehte Aufnahmen erreicht. Gewälzte Aufnahmen verringern die numerischen Korrelationen zwischen der Lage des Projektionszentrums im Bild- und im Objektkoordinatensystem (innere und äußere Orientierung) und stabilisieren die Bestimmung der affinen Kameraparameter. Zusätzliche Hochpunkte tragen ebenfalls zur Bestimmung der Kamerakonstanten und Hauptpunktlage bei. Schließlich sorgen bekannte Maßstäbe im Objektraum für eine Stabilisierung der Maßstäblichkeit entlang der Raumrichtungen, in denen Maßstäbe (Strecken) vorliegen.

Grundsätzlich lassen sich Kameras auch völlig ohne bekannte Maßstabsinformationen einzig durch Berücksichtigung der Strahlenschnittbedingungen im Objektraum kalibrieren (Wester-Ebbinghaus 1983b). Die Parameter der inneren Orientierung ergeben sich in Bezug auf das (beliebig skalierte) Bildkoordinatensystem genau in der Weise, dass sie optimal zu den rekonstruierten Strahlenbündeln passen, die lediglich in ihrer Form bestimmt werden.

Die in Abb. 4.12 dargestellten Aufnahmeprinzipien mit gegebenen Maßstäben (Längen) im Objektraum haben für bestimmte Anwendungen und Randbedingungen eine besondere Bedeutung. Maßstäbe mit gegebenen Solllängen sind zunächst in der Lage, fehlende Passpunkte zu ersetzen. Wenn die Maßstabsinformation ihrer Genauigkeit entsprechend in der Ausgleichung berücksichtigt wird, dann wird das Gesamtnetz geometrisch gestützt und führt darüber hinaus zu einer besseren Maßstäblichkeit der photogrammetrischen Objektrekonstruktion. Weiterhin haben Maßstäbe auch praktische Vorteile, da sie leichter zu beschaffen sind als kalibrierte Passpunkte, in ihrer Länge kalibriert, zertifiziert und auf die Einheit Meter rückgeführt werden können und darüber hinaus transportabel einsetzbar sind. Letzterer Aspekt ist besonders hilfreich bei der Kalibrierung mobiler Messsysteme (z.B. Stereokamera aus Abb. 1.6) und fest installierten Mehrkamerasystemen (Abb. 1.7, siehe Kap. 4.3.2.2).

Hådem und Åmdal (1992) untersuchen einen maßstabsgestützten Ansatz mittels numerischer Simulationen und praktischer Versuche für ein Stereoaufnahmesystem und vergleichen die Ergebnisse mit herkömmlichen Kalibrierverfahren und Punktanordnungen. In ihren Untersuchungen stellen sie fest, dass bis zu acht verschieden orientierte Positionen des Aufnahmesystems bzw. des beobachteten Maßstabes notwendig sind, um das entstehende Gleichungssystem lösen zu können und akzeptable Genauigkeiten zu erreichen. Es wird weiterhin nachgewiesen, dass die reine Verwendung von Maßstabsinformationen zu einer optimalen Maßstäblichkeit des kalibrierten Systems führt. Wenn die gewählten Raumpositionen und Orientierungen des beobachteten Maßstabs das gesamte Messvolumen repräsentieren, ist eine optimale Längenmessfähigkeit gegeben.

Mit der aus der Industriephotogrammetrie initiierten und im VDI/DGPF-Fachausschuss "Optische 3D-Messsysteme" verabschiedeten Richtlinie VDI/VDE 2634 "Annahme und Überwachung optischer 3D-Messsysteme", Blatt 1 "Punktförmig antastende Systeme", wurden die Grundkonzepte geeigneter Rundum-Aufnahmeverbände hinsichtlich einer standardisierten Prozedur zur Genauigkeitsbeurteilung photogrammetrischer Messsysteme weiterentwickelt (Luhmann & Wendt 2000). Der in dieser Richtlinie vorgeschlagene Prüfkörper besteht aus einem (typischerweise) 2m x 2m x 2m großen Würfel, in dessen Volumen signalisierte Verknüpfungspunkte und sieben in allen wichtigen Raumrichtungen angeordnete Längenverkörperungen mit wiederum jeweils bis zu fünf kalibrierten Teillängen vorhanden sind (Abb. 4.13). Der Körper besitzt keine Passpunkte. Nach Aufnahme eines Rundumverbandes mit beliebig vielen Bildern und selbstkalibrierender Bündelausgleichung werden die aus photogrammetrischen Messungen abgeleiteten Prüflängen mit ihren kalibrierten Sollmaßen verglichen und in einem Diagramm von Längenmessabweichungen dargestellt (Abb. 4.14). Die Längenmessunsicherheit des Gesamtsystems ist durch die maximale positive oder negative Längenmessabweichung definiert und stellt damit ein einfach interpretierbares, durchgreifendes und vergleichbares äußeres Qualitätsmaß eines photogrammetrischen oder optischen 3D-Messsystems dar. Die in Kapitel 5 diskutierten Auswertungen basieren in ihrer Beurteilung auf dem in VDI/VDE 2634 definierten Vorgehen. Innere Genauigkeiten (Präzision) auf Basis von Standardabweichungen werden hierbei nicht betrachtet.

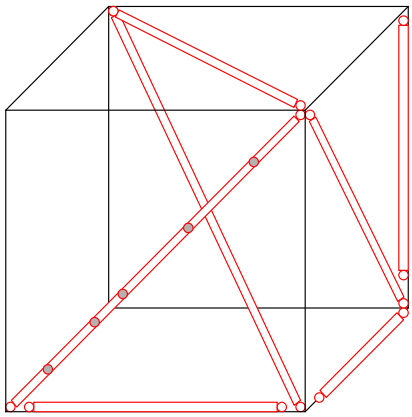


Abb. 4.13: Anordnung von Prüfstrecken im Messvolumen

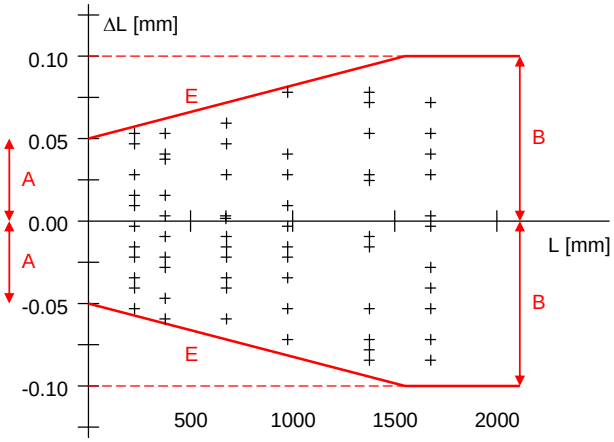


Abb. 4.14: Diagramm der Längenmessabweichung

4.3.2.2 Kalibrierung mit nur einem Maßstab

Das Prinzip der in Kap. 4.3.2.1 beschriebenen Simultankalibrierung setzt in der Regel voraus, dass eine oder mehrere Kameras um ein Objekt herumgeführt werden können, um eine hinreichende Anzahl konvergenter Bildstrahlen zu erhalten. Bei fest installierten Kameras kann ggf. alternativ ein Testfeld in unterschiedliche Positionen im Objektraum gebracht werden, wobei die in der Bündelausgleichung berechneten äußeren Orientierungen sich dann jeweils zunächst auf eine individuelle Testfeldposition beziehen und anschließend noch in ein gemeinsames System transformiert werden müssen.

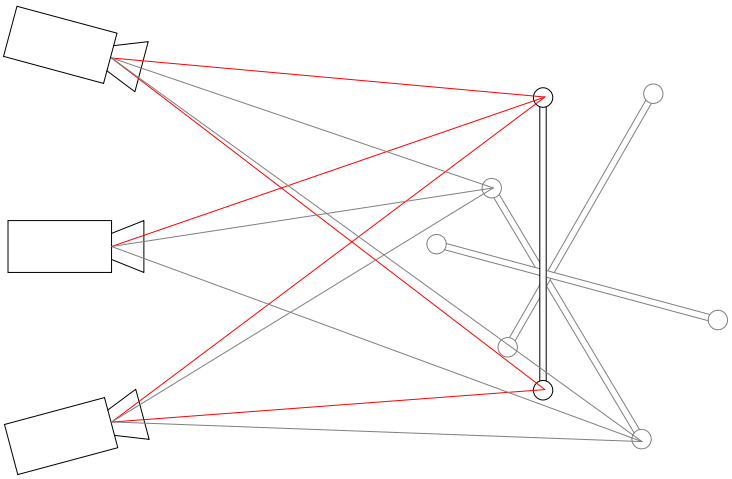


Abb. 4.15: Kalibrierung eines Aufnahmesystems mit einem bewegten Maßstab

Eine Alternative zur Kalibrierung und Orientierung fest angeordneter Sensoren gelingt mit der Beobachtung nur eines Maßstabes, der mehrfach im Objektraum bewegt und damit aus unterschiedlichen Raumrichtungen aufgenommen wird (Abb. 4.15). Dabei wird jede Maßstabsmessung als zusätzliche Beobachtungsgleichung in die Bündelausgleichung eingeführt. Die Datumsfestlegung erfolgt durch freie Netzausgleichung (sechs Freiheitsgrade), die fehlende Maßstabsinformation wird aus den Streckenbeobachtungen abgeleitet. Neben der einfachen Realisierung besitzt das Verfahren den Vorteil, den Objektraum vollständig durch bekannte Längen zu repräsentierten.

Maas (1999b) stellt einen Ansatz vor, der zur Orientierung und Kalibrierung eines stationären Mehrkamerasystems durch Beobachtung nur eines im Raum bewegten Maßstabes geeignet ist. Auf Basis numerischer Simulationen werden Anzahl der Maßstabsbeobachtungen, Position und Länge des Maßstabs sowie Anzahl beteiligter Kameras variiert und hinsichtlich der Güte der Kamerakalibrierung untersucht. Maas belegt unter anderem, dass die vollständige Systemkalibrierung durch Bildsequenzen eines im Raum zufällig bewegten Maßstabes möglich ist. Sinnvoll einsetzbar ist die Methode für Mehrkamerasysteme, die Bildsequenzen aufzeichnen können und die Zielpunkte des Maßstabes automatisch verfolgen und messen können. Systeme dieser Art finden sich in der medizinischen Navigation (Abb. 1.6b) oder Anwendungen des Motion Tracking (siehe Abb. 1.8).

5 Erweiterte Verfahren und Modelle

Die in Kap. 4 vorgestellten Abbildungsmodelle und Funktionen reichen in der überwiegenden Zahl der Anwendungen aus, um die üblichen in der Photogrammetrie eingesetzten Kameras zu kalibrieren. Erweiterte Modelle werden jedoch dann benötigt, wenn die zu kalibrierenden Kameras anderen Abbildungseigenschaften genügen oder höhere Anforderungen an die Messgenauigkeit gestellt werden, insbesondere wenn folgende Fälle auftreten:

- Berücksichtigung unterschiedlicher Wellenlängen,
  z.B. chromatische Aberration oder Durchdringung mehrerer optischer Medien;
- keine hinreichend zentralperspektive Abbildung,
  z.B. Verwendung von Fisheye-Objektiven oder telezentrischen Objektiven;
- komplexe Strahlengänge,
  z.B. Verwendung von Spiegeln oder Strahlteilern;
- Erfassung lokaler Sensordeformationen,
  z.B. Unebenheit von Bildsensoren;
- Erfassung von Instabilitäten der Kamera,
  z.B. bildvariante Veränderung des Projektionszentrums.

Die folgenden Abschnitte fassen Untersuchungen zusammen, in denen erweiterte Verfahren der Modellbildung hinsichtlich ihrer Eignung für photogrammetrische Sonderaufgaben behandelt werden. Die Darstellungen beinhalten die physikalischen Zusammenhänge und werden fallweise durch eigene Untersuchungsergebnisse belegt. Hinweise auf weiterführende Literatur geben Möglichkeiten zur Vertiefung des jeweiligen Stoffes.

5.1 Brechungsabhängige Modelle

5.1.1 Entfernungsabhängige Verzeichnung

Streng genommen gelten die oben genannten Ansätze zur Korrektur der Objektivverzeichnung nur für Punkte in einer parallel zur Bildebene liegenden Objektebene, auf die nach der Linsengleichung (3.10) im Abstand a' bzw. c vom bildseitigen Projektionszentrum fokussiert wurde (Fraser & Shortis 1992, Dold 1997). Abbildungsstrahlen von Objektpunkten, die außerhalb dieser Objektebene liegen, durchlaufen das Linsensystem auf einem anderen Weg und unterliegen daher anderen Verzeichnungswerten. Abb. 5.1 zeigt dazu beispielhaft die Verzeichnungskurven eines Objektivs für Objektpunkte mit unterschiedlichen Bildmaßstäben (Aufnahmeabständen).

Dieser Effekt kann durch Einführung eines entfernungsabhängigen Korrekturterms berücksichtigt werden. Dazu wird nach Fryer und Brown (1986) ein Skalierungsfaktor γ_{ss} eingeführt:

$$\gamma_{SS'} = \frac{c_{S'}}{c_S} = \frac{S'}{S} \cdot \frac{(S-c)}{(S'-c)} \tag{5.1}$$

mit c_S: Kamerakonstante (Bildweite) für Objektentfernung S
$c_{S'}$: Kamerakonstante (Bildweite) für Objektentfernung S'

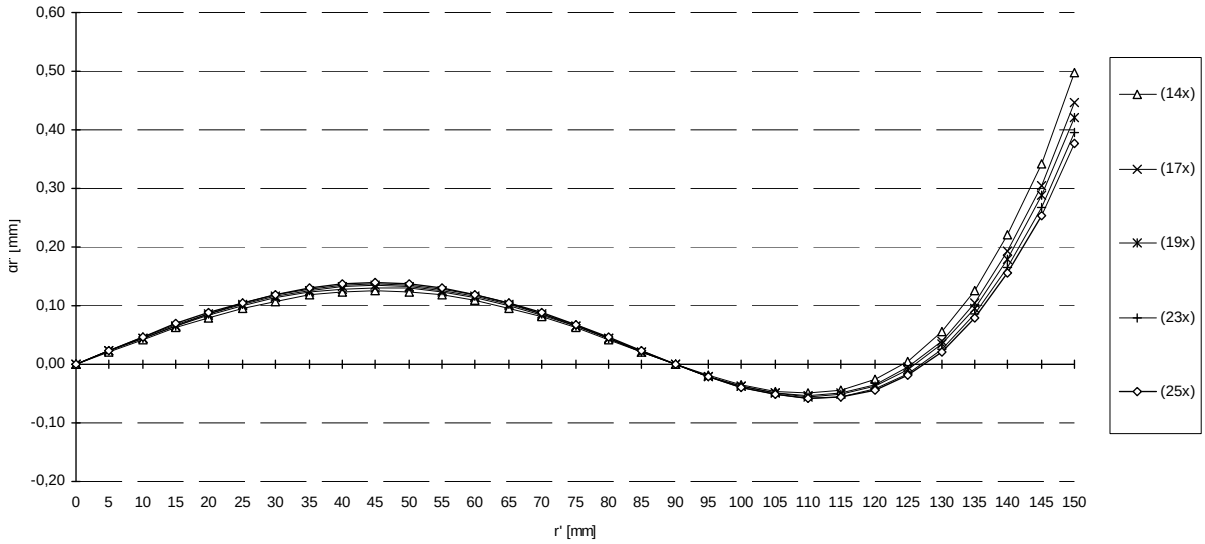


Abb. 5.1: Verlauf der Verzeichnungskurven eines Objektivs bei verschiedenen Bildmaßstäben (Dold 1997)

Liegen Verzeichnungsparameter $K_{1S'}$, $K_{2S'}$, $K_{3S'}$ nach (3.20) für die Objektebene in der Entfernung S' vor, so lässt sich die radial-symmetrische Verzeichnungskorrektur für Objektpunkte in der fokussierten Entfernung S wie folgt berechnen:

$$\Delta r'_{SS'} = \gamma^2_{SS'} K_{1S'} r'^3 + \gamma^4_{SS'} K_{2S'} r'^5 + \gamma^6_{SS'} K_{3S'} r'^7 \tag{5.2}$$

Dieser Ansatz ist vor allem für die hochgenaue Auswertung großmaßstäbiger Aufnahmesituationen ($m_b < 30$) und Objektive mit relativ geringen Verzeichnungswerten geeignet. Da der entfernungsabhängige Verzeichnungseffekt mit wachsendem Bildmaßstab (abnehmender Objektentfernung) zunimmt, schlagen Fraser und Shortis (1992) die Einführung eines empirisch ermittelten Korrekturfaktors $g_{SS'}$ vor, der für jeden Objektivtyp bestimmt werden kann:

$$\Delta r'_{SS'} = \Delta r'_S + g_{SS'} (\Delta r'_{S'} - \Delta r'_S) \tag{5.3}$$

Auch die radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung kann in Abhängigkeit von der fokussierten Entfernung S formuliert werden:

$$\begin{aligned} \Delta x'_S &= \left(1 - \frac{c}{S}\right) \cdot \left[P_1 (r'^2 + 2x') + 2P_2 x' y'\right] \\ \Delta y'_S &= \left(1 - \frac{c}{S}\right) \cdot \left[P_2 (r'^2 + 2y') + 2P_1 x' y'\right] \end{aligned} \tag{5.4}$$

Dold (1997) schlägt den folgenden Parametersatz zur entfernungsabhängigen Verzeichnungskorrektur vor, der im Gegensatz zu den oben genannten Ansätzen vollständig im Rahmen einer Bündelausgleichung mit Simultankalibrierung bestimmt werden kann:

$$\Delta r'_{Entf} = \frac{1}{Z^*} \left[D_1 \cdot r'(r'^2 - r'^2_0) + D_2 \cdot r'(r'^4 - r'^4_0) + D_3 \cdot r'(r'^6 - r'^6_0)\right] \tag{5.5}$$

mit

Z^* = Nenner aus den Kollinearitätsgleichungen (3.3) $\approx S$ (Aufnahmeabstand)

Die gesamte Bildfehlerkorrektur ergibt sich dann in Erweiterung von (3.28) zu

$$\begin{aligned} \Delta x' &= \Delta x'_{rad} + \Delta x'_{tan} + \Delta x'_{aff} + \Delta x'_{entf} \\ \Delta y' &= \Delta y'_{rad} + \Delta y'_{tan} + \Delta y'_{aff} + \Delta y'_{entf} \end{aligned} \tag{5.6}$$

Die Größenordnung der entfernungsabhängigen Verzeichnung liegt in der Regel unter 1 µm am Bildrand. Sie muss daher nur in hochgenauen Messaufgaben bestimmt werden, bei denen Bildmessgenauigkeiten im Submikrometerbereich erreicht werden. Dies trifft für großmaßstäbige, industrielle Anwendungen mit analogen Großformatkameras zu, vor allem aber für hochauflösende Digitalkameras, deren Sensoreigenschaften ein Genauigkeitspotential von unter 0.5 µm zulassen.

5.1.2 Chromatische Aberration

Die in Kap. 3.2.4.2 definierte chromatische Aberration führt bei Verwendung von panchromatischem Licht sowohl zu einer Längsverschiebung des Projektionszentrums (Farblängsfehler) als auch zu einer Querverschiebung des abgebildeten Punktes (Farbquerfehler). Beide Effekte müssen sich daher als wellenlängenabhängige Veränderung der Kamerakonstanten und der Verzeichnungsparameter auswirken, wobei diese voneinander abhängig sind (Kap. 4.2.1).

Die folgenden Untersuchungen wurden zwischen 2004 und 2006 am IAPG durchgeführt (Hastedt et al. 2006). Dabei sollte geklärt werden, ob chromatische Aberration bei herkömmlichen Digitalfarbkameras und entsprechenden Objektiven nachgewiesen, modelliert und bestimmbar ist. Die resultierende Auswirkung auf die 3D-Objektrekonstruktion sollte schließlich nach VDI/VDE 2634 nachgewiesen werden.

In jüngerer Zeit rücken zunehmend farbabhängige Abbildungsfehler in den Fokus, die in Farbbildern häufig schon mit bloßem Auge erkennbar sind. Hierbei wird vor allem das Ziel verfolgt, neue aberrationsfreie Farbbilder zu erzeugen, z.B. für hochqualitative 3D-Visualisierungen (Kaufmann & Ladstätter 2005) oder multispektrale Klassifizierungen (Schwalbe et al. 2006). In der Industriephotogrammetrie geht man dabei eher den Weg, aus einem Farbbild nur einen Kanal auszuwerten, i.d.R. den grünen Kanal oder den Intensitätskanal nach einer IHS-Transformation. Radiometrische und geometrische Effekte, die durch Objektiv und Sensor (z.B. Farbfilter) entstehen, werden hierbei üblicherweise vernachlässigt.

Die photogrammetrischen Korrekturpolynome für die radial-symmetrische Verzeichnung (A_1, A_2, A_3 bzw. K_1, K_2, K_3) werden im Rahmen einer Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung simultan mit den übrigen Kameraparametern bestimmt. Je nach gewählter Aufnahmeanordnung und Form des Objektpunktfeldes werden die Kameraparameter mit unterschiedlicher Genauigkeit und Zuverlässigkeit bestimmt. Korrelationen zwischen den ermittelten Kameraparametern sind dabei nicht immer zu vermeiden. Sie spielen allerdings nur dann eine Rolle, wenn die kalibrierten Parameter an eine andere Anwendung ohne zugehörige Kovarianzmatrix weitergegeben werden.

In jeder Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung existieren weiterhin numerische Korrelationen zwischen den Parametern der inneren und äußeren Orientierung, deren Größenordnung unter anderem von der gewählten Aufnahmekonfiguration und der verfügbaren Objektinformation abhängt. Sie führen dazu, dass z.B. die Lage des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem (c, x'_0, y'_0) teilweise durch entsprechende Verschiebung der äußeren Orientierungsparameter X_0, Y_0, Z_0 beschrieben werden kann.

Kameras	Anzahl Pixel	Sensorformat [mm]	Objektive [mm]
Fuji S2 Pro	3040 x 2016	23.3 x 15.6	14, 20, 28
Canon EOS D1 Mark II	4992 x 3328	36.0 x 24.0	35
Nikon D2X	4288 x 2848	23.5 x 15.6	24
Sigma SD10	2268 x 1512	20.7 x 13.8	24

Tab. 5.1: Untersuchte Kameras und Objektive

Ziel der folgenden Arbeiten ist zunächst die Erfassung der chromatischen Aberration im Rahmen typischer Testfeldkalibrierungen. Die Versuche werden mit verschiedenen hochauflösenden Digitalspiegelreflexkameras und verschiedenen Objektiven durchgeführt (Tab. 5.1). Die Aufnahmen werden an ebenen sowie an räumlichen Testfeldern erzeugt, für die entweder hinreichend genaue Referenzkoordinaten oder kalibrierte Referenzlängen vorliegen (Abb. 5.2).

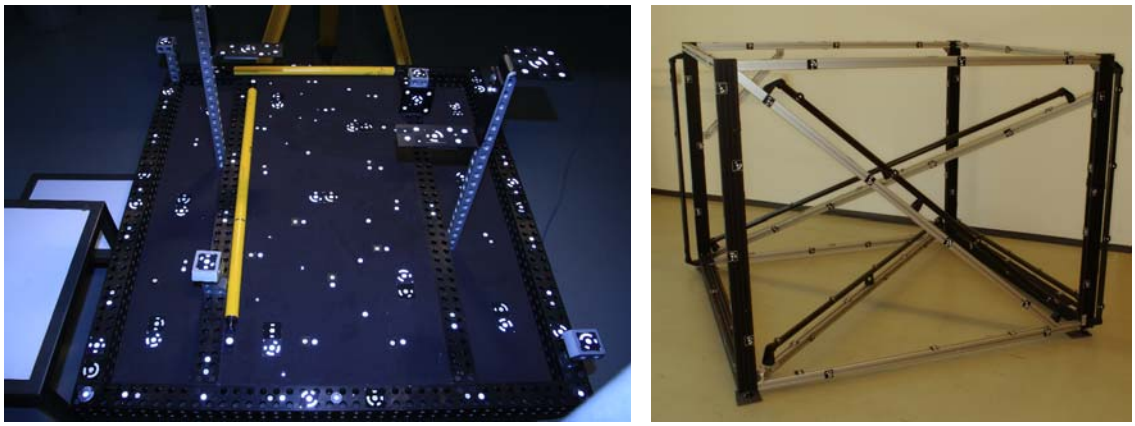


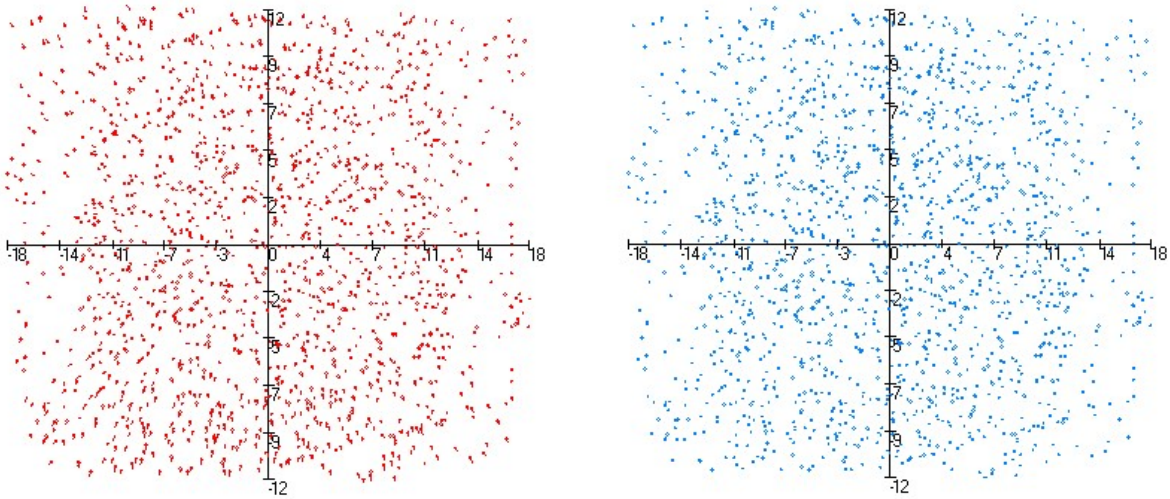
Abb. 5.2: Ebenes (IAPG) und räumliches Testfeld (AICON)

Für die Auswertung werden zunächst Einzelbilder durch Trennung der Farbkanäle erzeugt. In den einzelnen Kanälen sowie in den Farb- und Graustufenbildern erfolgt eine Bildpunktmessung mit anschließender Bündelausgleichung mit dem Programm AICON 3D Studio. Diesem Schritt schließt sich eine kombinierte Auswertung der in den einzelnen Kanälen erzeugten Bildmessungen mit dem Bündelausgleichungsprogramm Ax.Ori (AXIOS 3D) an. Für die Ausgleichung werden drei Kameras jeweils für R, G und B eingeführt, deren äußere Orientierungen für jeden Aufnahmestandort festgehalten werden, d.h. sie werden pro Standort nur einmal bestimmt. Die Kameraparameter c, x'_0, y'_0 sowie A_1, A_2, A_3 sind variabel definiert. Die tangential-asymmetrische Verzeichnung (B_1, B_2) sowie Affinität und Scherung (C_1, C_2) sind fixiert. Die Datumsfestlegung erfolgt durch freie Netzausgleichung über alle Objektpunkte und ggf. über Maßstabsinformationen.

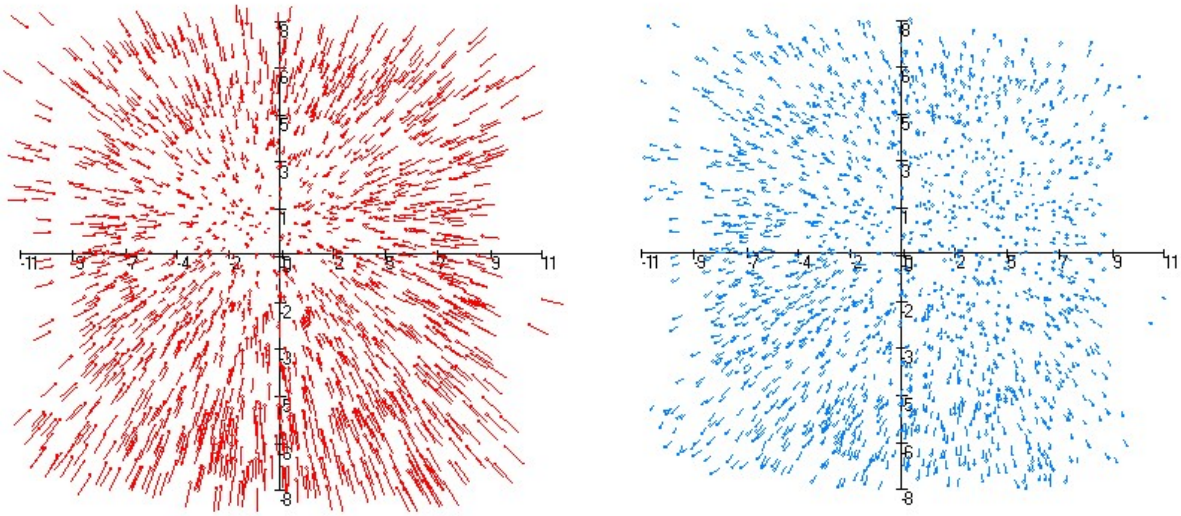
5.1.2.1 Farbabhängige Kalibrierung

Die unterschiedlichen Bildmessungen in den drei Farbkanälen werden zunächst als Vektordiagramme dargestellt. Abb. 5.3 zeigt beispielhaft für zwei Datensätze die Ergebnisse der Bildmessungen im grünen Farbkanal als Verschiebungsvektoren zu korrespondierenden Messungen im roten bzw. blauen Kanal.

Während die Darstellungen der Canon EOS D1 mit 35mm Objektiv praktisch keine systematischen Effekte zeigen, sind bei der Fuji S2 Pro mit 20mm Objektiv signifikante radial-systematische Abbildungsfehler erkennbar. Sie können in dieser Form auch für die anderen untersuchten Kameras nachgewiesen werden. Die für den roten Kanal nach außen und für den blauen Kanal nach innen weisenden Vektoren entsprechen der physikalischen Theorie (Kap. 3.2.4.2) und gehen konform mit der Brennweitenänderung nach Abb. 3.8.



Canon EOS D1 mit 35mm Objektiv



Fuji S2 Pro mit 20mm Objektiv

Abb. 5.3: Vektordarstellung der Bildmessungen in R und B gegenüber G-Kanal

Kamerakonstante	c_R	c_G	c_B
Canon EOS D1 mit 35mm	-33.3337	-33.3299	-33.3309
Fuji S2 Pro mit 20mm	-20.5739	-20.5557	-20.5468
Bildhauptpunkt x'$_0$	x'_{0R}	x'_{0G}	x'_{0B}
Canon EOS D1 mit 35mm	-0.0345	-0.0342	-0.0341
Fuji S2 Pro mit 20mm	0.2812	0.2818	0.2812
Bildhauptpunkt y'$_0$	y'_{0R}	y'_{0G}	y'_{0B}
Canon EOS D1 mit 35mm	-0.0494	-0.0493	-0.0490
Fuji S2 Pro mit 20mm	-0.2080	-0.2095	-0.2105

Tab. 5.2: Kameraparameter bei kombinierter Auswertung (Auswahl)

Die Ergebnisse der kombinierten Auswertung bestätigen ebenfalls die in Abb. 3.8 angegebenen theoretischen Abhängigkeiten der Kamerakonstante vom Farblängsfehler. Bei allen Datensätzen aus Tab. 5.1, mit Ausnahme der Canon, ergeben sich kürzere Kamerakonstanten im blauen Kanal c_B als im roten Kanal c_R (Tab. 5.2). Die

Bildhauptpunktkoordinaten sind für alle drei Kanäle identisch, d.h. die theoretisch wellenlängenunabhängige Lage der optischen Achse wird ebenfalls bestätigt.

5.1.2.2 Längenmessabweichung

Die Analyse der ausgeglichenen Objektpunktkoordinaten zeigt eine Verbesserung der inneren Genauigkeit um den Faktor 1.7. Der Wert entspricht etwa $\sqrt{3} = 1.73$ und kann auch dadurch erreicht werden, dass die in nur einem Kanal gemessenen Bildkoordinaten dreifach in die Ausgleichung eingeführt werden. Es handelt sich folglich zunächst nur um eine scheinbare Genauigkeitssteigerung.

Die RMS-Werte der Objektkoordinaten liegen je nach Kamera und Objektiv zwischen 0.005 mm (Nikon D2X) und 0.04 mm (Fuji S2) bei einem Messvolumen zwischen ca. 1 m x 1 m x 0.6 m und 2 m x 2 m x 1.5 m. Das innere Genauigkeitsniveau ist also als extrem hoch zu bewerten.

Mit dem bei der Firma AICON vorhandenen 3D-Testkörper kann die ISO-konforme Längenmessabweichung gemäß VDI 2634 bestimmt werden. Die dort vorhandenen Referenzlängen sind mit einer Messunsicherheit von etwa 5µm kalibriert und zertifiziert. Mit einer Nikon D2X und verschiedenen Objektiven (20mm, 24mm) wurden Rundum-Bildverbände aufgenommen und nach dem obigen Verfahren ausgewertet. Die ermittelten Längenmessabweichungen liegen bei bis zu 0.1 mm, auch für Auswertungen, in denen nur der grüne Kanal verwendet worden ist.

Abb. 5.4 zeigt am Beispiel der Nikon D2X mit 24mm Objektiv eine Genauigkeitssteigerung der Längenmessabweichung von 0.12 mm auf 0.08 mm, entsprechend ca. 30%. Andere Kamera-Objektiv-Kombinationen verhalten sich anders und lassen teilweise keine Genauigkeitsänderungen erkennen.

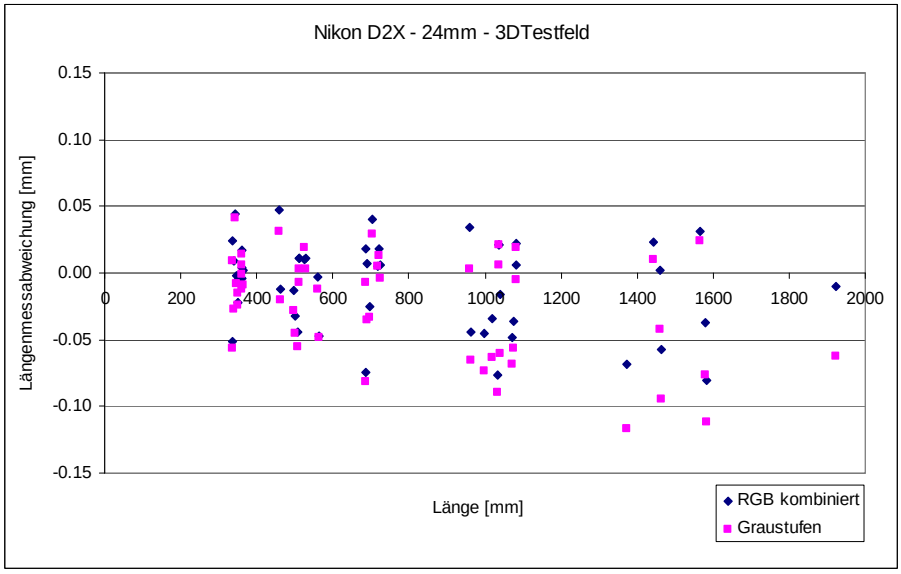


Abb. 5.4: Diagramm der Längenmessabweichungen für Nikon D2X (24mm)

5.1.2.3 Fazit

Die objektivabhängige chromatische Aberration erzeugt je nach Objektivgüte unterschiedliche Bilder in den einzelnen RGB-Kanälen. Der Effekt kann signifikant modelliert werden, wenn in der Bündelausgleichung jeweils drei Kameras für RGB eingeführt werden. Mit Hilfe zusätzlicher Bedingungen für die äußeren Orientierungen dieser Kameras werden die farbabhängigen Kameraparameter entsprechend der physikalischen Theorie bestimmt.

Das ohnehin schon sehr hohe Genauigkeitsniveau bei der Mehrbildmessung signalisierter Punkte wird durch diesen Ansatz nur um ca. 10-30% erhöht. Gleichzeitig können die ermittelten Kameraparameter für eine exakte geometrische Farbkorrektur eines Bildes genutzt werden. Die Modellierung der chromatischen Aberration ist auch dann sinnvoll, wenn mit Zielmarken unterschiedlicher Farbgebung gearbeitet wird (Cronk et al. 2006). Bei unberücksichtigter Modellierung der chromatischen Aberration werden in diesem Fall verschiedenfarbige Messpunkte unterschiedlich verzeichnet abgebildet.

5.1.3 Mehrmedien-Abbildung

5.1.3.1 Lichtbrechung an Trennflächen

Das normale photogrammetrische Abbildungsmodell nimmt Kollinearität zwischen Objektpunkt, Projektionszentrum und Bildpunkt an. Objektiv- oder sensorbedingte Abweichungen werden durch Korrekturparameter im Bildraum erfasst. Diese Vorgehensweise genügt für die meisten Aufnahmeanordnungen.

Durchdringen die Abbildungsstrahlen im Bild- oder Objektraum Medien unterschiedlicher Brechzahl, wird der geradlinige Strahlverlauf gestört. Mit erweiterten funktionalen Modellen der Mehrmedienphotogrammetrie ist es möglich, den Strahlengang durch zusätzliche optische Trennflächen zu beschreiben und bei der Kameramodellierung und Objektrekonstruktion zu berücksichtigen. Optische Trennflächen sind vorhanden, wenn der Strahlengang zum Beispiel durch folgende Medien verläuft:

- Glaswände im Objektraum (Glasbehälter, Fenster)
- Objektaufnahme unter oder durch Wasser
- inhomogene Atmosphäre (Refraktion)
- objektseitig aufgesetzte Filter vor dem Objektiv
- Objektivlinsen
- Abdeckplatten auf elektro-optischen Sensoren
- Réseauplatte

Zur strengen Modellierung des Strahlenganges muss die Trennfläche geometrisch beschrieben werden, zum Beispiel als

- Ebene im Raum
- Fläche zweiter Ordnung (Kugel, Ellipsoid)
- wellenförmige Oberfläche

Üblicherweise werden die durchdrungenen Medien als homogen und isotrop vorausgesetzt, d.h. die Strahlausbreitung verläuft gleichförmig in allen Richtungen.

Parallele ebene Trennflächen

Der einfachste Fall eines Mehrmedienfalles liegt vor, wenn nur eine ebene Trennfläche im Strahlengang parallel zur Bildebene angeordnet ist (Abb. 5.5). Dann wird ein Objektpunkt P_1 über den Zwischenpunkt P_0 auf der Trennfläche T in den Punkt P'_0 abgebildet. Dabei entsteht ein radialer Lageversatz $\Delta r'$ zum Bildpunkt P'_1, der einer kollinearen Abbildung ohne Trennfläche entspräche.

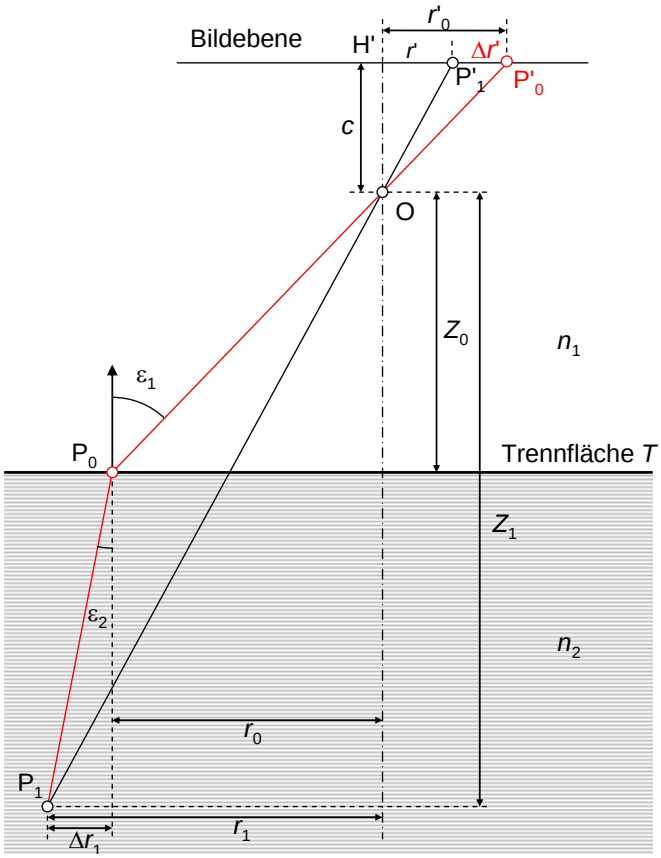


Abb. 5.5: Ebene Trennfläche parallel zur Bildebene

Der Lageversatz $\Delta r'$ für Punkte P_i ergibt sich aus Abb. 5.5 mit (3.4) zu[1]:

$$\Delta r' = r'_0 \cdot Z_{rel}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{n^2 + (n^2 - 1)\tan^2 \varepsilon_1}}\right) \tag{5.7}$$

$$\text{mit } Z_{rel} = \frac{Z_i - Z_0}{Z_i} \text{ und } r'_0 = c \cdot \tan \varepsilon_1$$

Gleichung (5.7) zeigt, dass der Einfluss der Strahlbrechung entfernungsabhängig ist. Der Lageversatz verschwindet, wenn

1. ε_1=0: der Abbildungsstrahl verläuft senkrecht zur Trennebene und wird nicht gebrochen;
2. n=1: beide Medien besitzen denselben Brechungsindex;
3. Z_i=Z_0: der Objektpunkt liegt auf der Trennebene (Z_{rel}=0).

Es lässt sich zeigen, dass (5.7) durch folgende Potenzreihe dargestellt werden kann:

$$\Delta r' = Z_{rel} \cdot (A_0 \cdot r'_0 + A_1 \cdot r'^3_0 + A_2 \cdot r'^5_0 + \ldots) \tag{5.8}$$

Die Reihenentwicklung ähnelt den üblichen Ansätzen zur Korrektur sowohl der einfachen radial-symmetrischen Verzeichnung in (4.18) und (4.20) als auch der entfernungsabhängigen Verzeichnung (5.5). Für Anwendungsfälle, in denen Z_{rel} bei 1 liegt, kann der Einfluss einer ebenen parallelen Trennfläche vollständig durch entfernungsunabhängige radial-symmetrische Verzeichnungskorrektur aufgefangen werden.

[1] Die Herleitungen und Abbildungen folgen Kotowski (1987).

Der Ansatz von Gleichung (5.7) kann auf beliebig viele parallele ebene Trennflächen erweitert werden, zum Beispiel zur Modellierung planparalleler Platten im Aufnahmesystem (Filter, Réseau) oder von Glasscheiben im Objektraum (Abb. 5.6). Für *p* Trennebenen ergibt sich der resultierende Lageversatz zu:

$$\Delta r' = \frac{r'_0}{Z_i} \cdot \left[(Z_i - Z_{01}) - \sum_{l=1}^{p} \frac{d_l}{\sqrt{N_l^2 + (N_l^2 - 1)\tan^2 \varepsilon_1}} \right] \tag{5.9}$$

mit

$d_l = Z_{l+1} - Z_l$: Abstand zweier benachbarter Trennebenen

$N_l = \frac{n_{l+1}}{n_l}$: relativer Brechungsindex

Geht man in (5.9) zu differentiellen Abständen zwischen den Trennflächen über, lassen sich geschichtete Medien modellieren. So ließe sich beispielsweise ein Atmosphärenmodell zur Beschreibung der Refraktion aufstellen.

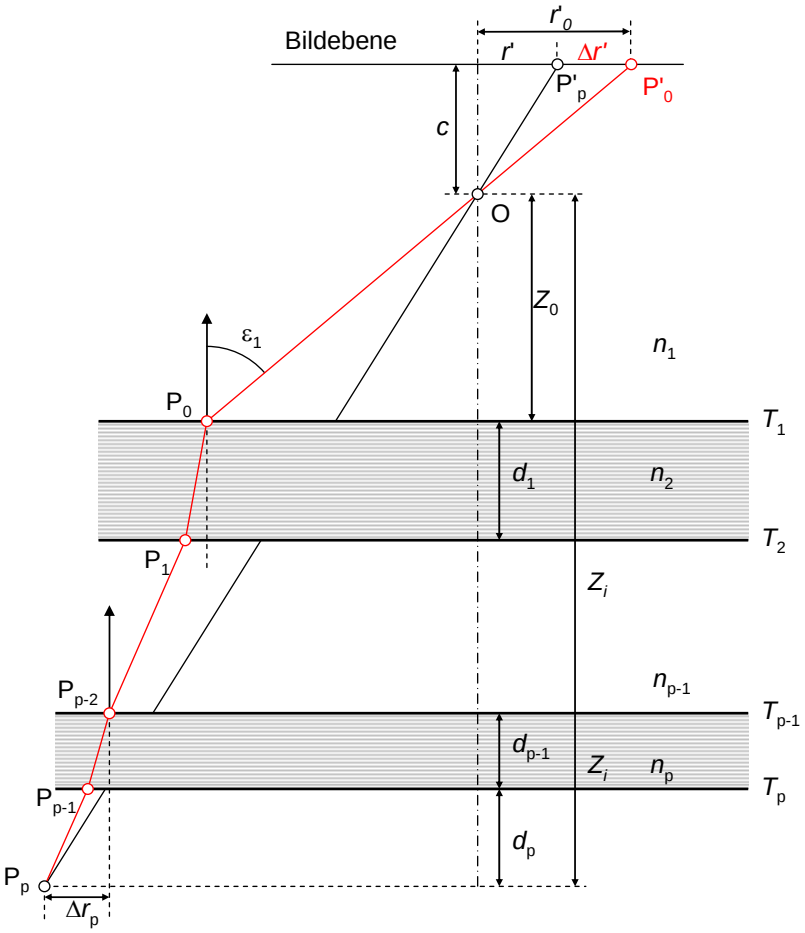


Abb. 5.6: Mehrere parallele ebene Trennflächen

Strahlverfolgung durch lichtbrechende Flächen

Liegen beliebige Trennflächen bei der Abbildung vor, muss jeder Abbildungsstrahl durch sukzessive Anwendung des Brechungsgesetzes durch sämtliche Medien verfolgt werden (Strahlverfolgung, *ray tracing*). Dazu wird an jedem Brechungspunkt einer Trennfläche ein System von drei Bedingungsgleichungen aufgestellt, das die 3D-Koordinaten dieses Punktes liefert und den Strahlverlauf von einem Punkt P_0 über den Durchgangspunkt P_1 zum Punkt P_2 beschreibt (Abb. 5.7):

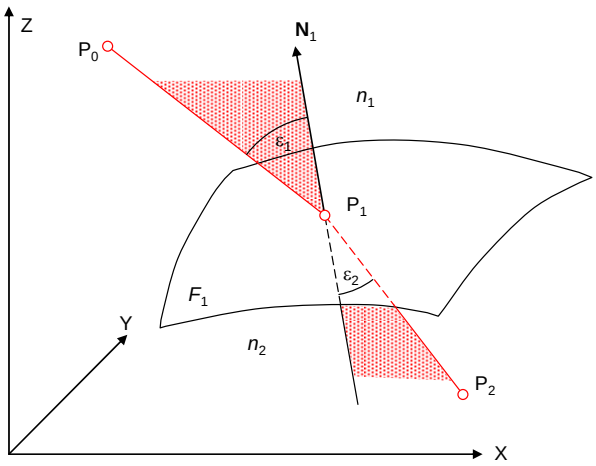


Abb. 5.7: Strahlverfolgung durch eine optische Trennfläche

1. P_1 liegt auf der Fläche F_1:

   Die Bedingung wird mit
   $F_1(X_1, Y_1, Z_1) = 0$
   erfüllt. Für eine allgemeine Fläche zweiter Ordnung gilt:

$$\begin{aligned} F_1 &= \mathbf{X}^T \mathbf{A} \mathbf{X} + 2\mathbf{a}^T \mathbf{X} + a = 0 \\ &= f_S(\mathbf{X}, \mathbf{A}, \mathbf{a}, a) \end{aligned} \tag{5.10}$$

   mit $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$, $\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}$ und $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$, $a_{ij} = a_{ji}$ für $i \neq j$

   Die Fläche kann in einem Hilfskoordinatensystem parametrisiert werden, zum Beispiel als rotationssymmetrischer Körper oder als wellenförmige Oberfläche.

2. Erfüllung des Brechungsgesetzes:
   $F_2 = n_1 \cdot \sin \varepsilon_1 = n_2 \cdot \sin \varepsilon_2 = 0$

   Die Ein- und Ausfallswinkel werden als Funktion der Objektkoordinaten und des Normalenvektors $\mathbf{N_1}$ eingeführt, z.B. für ε_1:

$$\cos \varepsilon_1 = \frac{\mathbf{N}_1^T \cdot (\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}_1)}{\left|\mathbf{N}_1^T\right| \cdot \left|\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}_1\right|} \tag{5.11}$$

3. Flächennormale in P_1 und Abbildungsstrahlen liegen in einer Ebene:

   Zur Formulierung wird die Koplanaritätsbedingung der drei Vektoren genutzt:

$$F_3 = \begin{vmatrix} X_0 - X_1 & Y_0 - Y_1 & Z_0 - Z_1 \\ X_1 - X_2 & Y_1 - Y_2 & Z_1 - Z_2 \\ N_X & N_Y & N_Z \end{vmatrix} = 0 \tag{5.12}$$

   Die drei Bedingungsgleichungen werden an Näherungswerten linearisiert. Die Lösung des Gleichungssystems liefert die Objektkoordinaten X_1, Y_1, Z_1 des Brechungspunktes.

Für ein Abbildungssystem aus p Trennflächen wird das Gleichungssystem für jeden Brechungspunkt P_l, l=1…p, aufgestellt. Das Prinzip wird in der Optik zur Berechnung von Linsensystemen eingesetzt (Optikrechnung). In der Photogrammetrie ließe sich damit eine konsequente Verzeichnungsbestimmung durchführen, die jedes optische Element berücksichtigen würde. Dieser Weg wurde jedoch bisher nicht beschritten.

5.1.3.2 Erweitertes Modell der Bündeltriangulation

Mit den oben besprochenen Grundlagen der optischen Trennflächen und Strahlverfolgung lässt sich das funktionale Modell der Bündeltriangulation erweitern. Dazu wird der Algorithmus zur Strahlverfolgung durch beliebig viele Trennflächen in das Abbildungsmodell der Kollinearitätsgleichungen (3.3) integriert.

Es bietet sich an, die zwei wesentlichen praktischen Aufnahmekonstellationen zu unterscheiden:

- konstante (objektinvariante) Lage der Trennflächen relativ zum Messobjekt
- konstante (bündelinvariante) Lage der Trennflächen relativ zum Aufnahmesystem

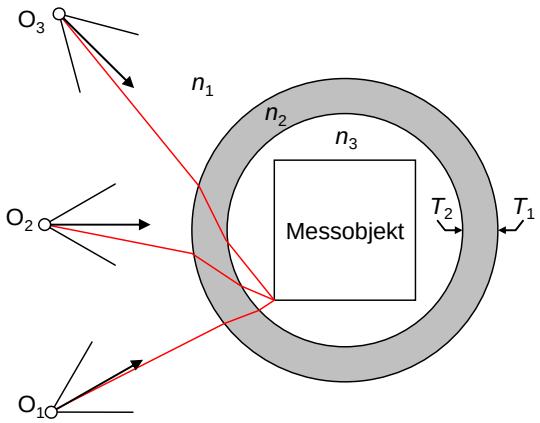


Abb. 5.8: Objektinvariante Trennflächen

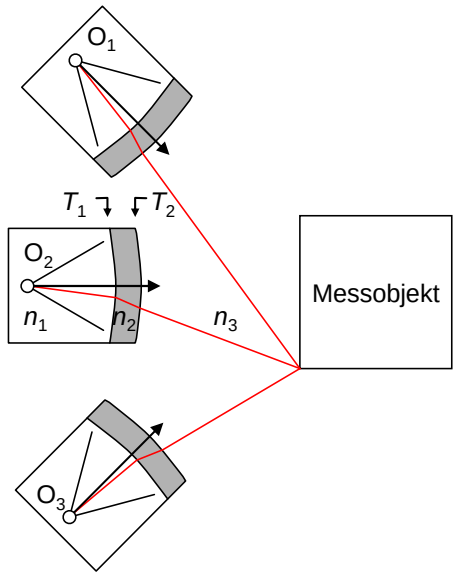


Abb. 5.9: Bündelinvariante Trennflächen

Objektinvariante Trennflächen

Objektinvariante Trennflächen liegen beispielsweise vor, wenn ein Objekt durch Glasscheiben oder Wasser hindurch beobachtet wird (Abb. 5.8). Die erweiterten Beobachtungsgleichungen ergeben sich in drei Schritten:

1. Strahlverfolgung nach Gleichung (5.10) über p Trennflächen:

$$\overline{\mathbf{X}}_i^l = f_S(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_{0j}, \mathbf{A}^l, \mathbf{a}^l, a^l, n^l) \tag{5.13}$$

mit

$\mathbf{A}^l$, $\mathbf{a}^l$, a^l:	Trennflächenparameter
n^l:	relative Brechungsindizes
l=1…p:	Flächenindex
i:	Punktindex
j:	Bildindex
k:	Kameraindex

2. Räumliche Drehverschiebung:

$$\mathbf{X}_{ij}^{*} = \mathbf{R}_j \cdot \overline{\mathbf{X}}_i^1 - \mathbf{X}_{0j}$$

$$\begin{bmatrix} X_{ij}^{*} \\ Y_{ij}^{*} \\ Z_{ij}^{*} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_j \cdot \begin{bmatrix} \overline{X}_i^1 - X_{0j} \\ \overline{Y}_i^1 - Y_{0j} \\ \overline{Z}_i^1 - Z_{0j} \end{bmatrix} \tag{5.14}$$

3. Erweiterte Kollinearitätsgleichungen (z' = –c):

$$\begin{bmatrix} x'_{ij} \\ y'_{ij} \end{bmatrix} = \frac{z'}{Z_{ij}^{*}} \cdot \begin{bmatrix} X_{ij}^{*} \\ Y_{ij}^{*} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x'_{0k} \\ y'_{0k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx'_k \\ dy'_k \end{bmatrix} \tag{5.15}$$

Bündelinvariante Trennflächen

Bündelinvariante Trennflächen sind Grenzflächen optischer wirksamer Medien im Aufnahmesystem, z.B. Unterwassergehäuse, Aufsatzfilter, Linsen, planparallele Sensorabdeckungen oder Réseauplatten (Abb. 5.9).

Im Gegensatz zur objektinvarianten Formulierung wird hier die Reihenfolge der Berechnungen vertauscht:

1. Räumliche Drehverschiebung:

$$\mathbf{X}_{ij}^{*} = \mathbf{R}_j \cdot \mathbf{X}_i^1 - \mathbf{X}_{0j} \tag{5.16}$$

2. Strahlverfolgung:

$$\overline{\mathbf{X}}_{ij}^{l} = f_S(\mathbf{X}_{ij}^{*}, \mathbf{A}^l, \mathbf{a}^l, a^l, n^l) \tag{5.17}$$

3. Erweiterte Kollinearitätsgleichungen (z' = –c):

$$\begin{bmatrix} x'_{ij} \\ y'_{ij} \end{bmatrix} = \frac{z'}{\overline{Z}_{ij}^1} \cdot \begin{bmatrix} \overline{X}_{ij}^1 \\ \overline{Y}_{ij}^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x'_{0k} \\ y'_{0k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x'_k \\ \Delta y'_k \end{bmatrix} \tag{5.18}$$

Die durch bündelinvariante Trennflächen verursachten Bildpunktverschiebungen sind in der Regel entfernungsunabhängig. Sind die Trennflächen rotationssymmetrisch (Linsen) bzw. parallel zur Bildebene liegende planparallele Platten (Réseau, Filter), wirken die Verschiebungen radial-symmetrisch und können bei geeigneter Kamerakalibrierung mit den üblichen Verzeichnungsansätzen erfasst werden.

Weitere Anwendungen und Algorithmen der Mehrmedienphotogrammetrie beschreiben u.a.: Putze (2007) und Maas (1995) für Anwendungen der Strömungsmesstechnik; Fryer und Fraser (1986) zur Kalibrierung von Unterwasserkameras; Höhle (1971) zur Unterwasser-Photogrammetrie.

5.2 Lokale Bilddeformationen

Dieser Abschnitt befasst sich mit Verfahren zur flächenhaften Erfassung von Bilddeformationen, die sich nicht hinreichend durch Funktionen zur Beschreibung von Abbildungsfehlern kompensieren lassen. Lokale Bilddeformationen entstehen beispielsweise durch örtliche Unebenheiten des Bildsensors, wie sie bei analogen Messbildern durch Filmunebenheiten bekannt sind. Weitere mögliche Ursachen für lokale Deformationen liegen in inhomogenen optischen Zusatzelementen, z.B. Spiegeln oder Strahlteilern mit asymmetrischen Abbildungseigenschaften.

Die hier vorgestellten Lösungsansätze basieren auf einer rasterförmigen Erfassung lokaler Abbildungsfehler in Form eines Korrekturgitters. Das gewählte Raster kann je nach Verfahren eine minimale Gitterweite von bis zu 1 Pixel besitzen. Geometrische Bedingungen zwischen benachbarten Rasterelementen können zur Glättung und Vermeidung von Unstetigkeiten im Bildraum eingesetzt werden und stabilisieren die mathematische Berechnung des Korrekturgitters.

5.2.1 Finite Elemente

Finite-Elemente-Methoden werden für eine Vielzahl technischer Fragestellungen eingesetzt, in denen durch Knoten- und Nachbarschaftsmodelle räumlicher Punktverteilungen komplexe mechanische oder geometrische Veränderungen eines Objektraumes beschrieben werden. Hauptanwendungen liegen im Bereich der Mechanik, Statik und Thermodynamik (z.B. Meisner & Maurial 2008). Im photogrammetrischen Umfeld werden Finite Elemente zur Modellierung von digitalen Geländemodellen eingesetzt (Kraus 2000).

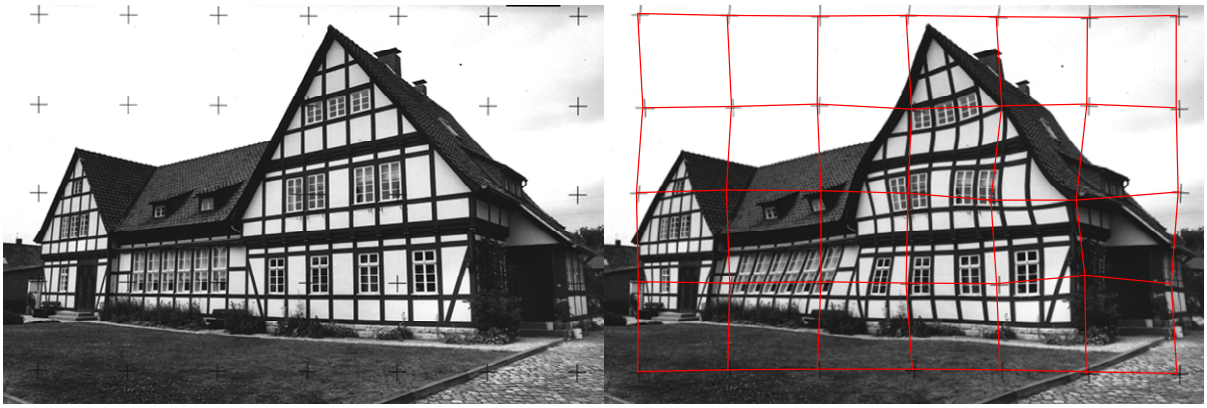


Abb. 5.10: Beispiel einer Réseauaufnahme (Rollei 3003 metric) mit simulierter Filmdeformation

Für die Erfassung lokaler Bilddeformationen im Bildraum wurden in der analogen Kameratechnik erfolgreich Réseaugitter eingesetzt. Sie dienen zum einen zur Definition eines kamerafesten Bildkoordinatensystems, zum anderen aber vor allem zur lokalen Kompensation von Filmdeformationen. Réseaus wurden insbesondere für Kameras ohne mechanische Bildverebnung eingesetzt (Wester-Ebbinghaus 1989, Brown 1984). Abb. 5.10 zeigt eine beispielhafte Aufnahme mit einer Kleinbild-Réseaukamera Rollei 3003 metric, für die eine übertrieben dargestellte Filmdeformation simuliert worden ist.

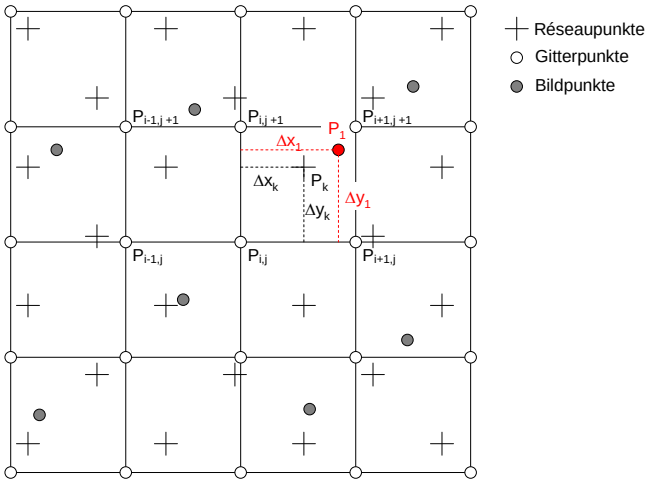


Abb. 5.11: Réseaupunkte und Bildpunkte innerhalb eines regelmäßigen Interpolationsgitters (Kotowski 1984)

Bei Réseaubildern wird vorzugsweise eine maschenweise affine oder bilineare Transformation verwendet. Für Bilder, in denen kein regelmäßiges Réseaugitter abgebildet oder erkennbar ist (z.B. nicht-messbares Kreuz in Abb. 5.10), wird mit einem Ansatz nach der Methode der finiten Elemente ein synthetisches Punktgitter generiert, in dem anschließend die eigentliche maschenweise Transformation der gemessenen Bildpunkte ausgeführt wird (Kotowski 1984).

Nach einer ersten globalen Affintransformation aller gemessenen *s* Réseaupunkte liegen Restklaffungen an den Réseaupunkten sowie Abweichungen *dx*,*dy* an den Punkten eines neu zu berechnenden *m* x *n* großen Interpolationsgitters vor (Abb. 5.11). Diese Abweichungen gehen als Beobachtungen in Verbesserungsgleichungen der bilinearen Form

$$\begin{aligned} v(dx)_k &= (1-\Delta x_k)(1-\Delta y_k)dx_{i,j} + \Delta x_k(1-\Delta y_k)dx_{i+1,j} \\ &\quad + (1-\Delta x_k)\Delta y_k dx_{i,j+1} + \Delta x_k \Delta y_k dx_{i+1,j+1} - dx_k \\ \text{mit } & k = 1,\ldots,s \end{aligned} \tag{5.19}$$

ein. Weiterhin werden die zweiten Ableitungen minimiert, d.h. das Interpolationsgitter weist an den Nahtstellen benachbarter Punkte minimale Krümmungen auf:

$$\begin{aligned} v(dx)_{x,x_{i,j}} &= dx_{i-1,j} - 2dx_{i,j} + dx_{i+1,j} - 0 \\ \text{mit} & \\ i &= 2,\ldots,m-1 \\ j &= 1,\ldots,n \end{aligned} \tag{5.20}$$

Ebenso wird in y-Richtung verfahren. Das gesamte System von Verbesserungsgleichungen wird durch Ausgleichung gelöst. Dabei lassen sich sowohl die Stützpunktbeobachtungen als auch die zweiten Differenzen individuell gewichten, um die Glättung des interpolierten Gitters zu steuern. Die oben beschriebene Réseautransformation bezeichnet man auch als Finite-Elemente-Interpolation. Munji (1986) hat das Prinzip zur Kalibrierung von Teilmesskameras eingesetzt.

Ein ähnlicher Ansatz kann zur Beschreibung von Unebenheiten digitaler Bildsensoren verwendet werden, dann konstant für einen Sensor bzw. eine ganze Bildserie (Tecklenburg & Luhmann 2000). Es wird wieder ein stützpunktbezogenes, rasterförmiges Korrekturgitter auf der Basis der Finite-Elemente-Methode gewählt, deren Gitterschnittpunkte die entsprechenden Korrekturwerte in Form von ebenen Vektoren aufnehmen.

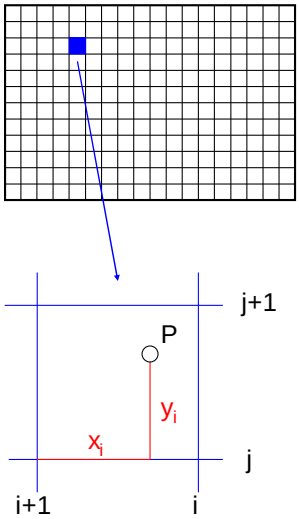


Abb. 5.12: Interpolation im Korrekturgitter

Die Interpolation der Korrekturwerte für einen gemessenen Bildpunkt erfolgt dann linear nach folgendem Ansatz (Kraus 2000, siehe Abb. 5.12):

$$\begin{aligned} x_{korr} &= (1 - x_l - y_l + x_l \cdot y_l) \cdot k_{x[i,j]} \\ &\quad + (x_l - x_l \cdot y_l) \cdot k_{x[i+1,j]} \\ &\quad + (y_l - x_l \cdot y_l) \cdot k_{x[i,j+1]} \\ &\quad + x_l \cdot y_l \cdot k_{x[i+1,j+1]} \end{aligned} \qquad \begin{aligned} y_{korr} &= (1 - x_l - y_l + x_l \cdot y_l) \cdot k_{y[i,j]} \\ &\quad + (x_l - x_l \cdot y_l) \cdot k_{y[i+1,j]} \\ &\quad + (y_l - x_l \cdot y_l) \cdot k_{y[i,j+1]} \\ &\quad + x_l \cdot y_l \cdot k_{y[i+1,j+1]} \end{aligned} \tag{5.21}$$

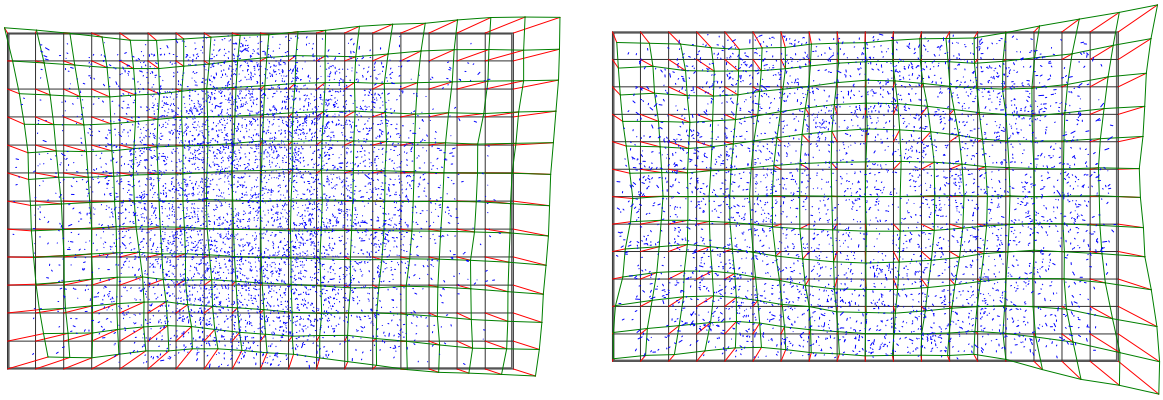
Dabei stellt x_{korr} die Korrektur der gemessenen Bildkoordinate (x) dar, die Koordinaten x_l,y_l beschreiben die lokale Position des gemessenen Bildpunktes innerhalb eines Gitterelements und die Elemente $k_{x[i,j]}$, $k_{x[i+1,j]}$, $k_{x[i,j+1]}$, $k_{x[i+1,j+1]}$ sind die beteiligten Gitterschnittpunkte. Der gleiche Aufbau ergibt sich für die Bildkoordinate (y). Die Kollinearitätsgleichungen werden um den oben genannten Ansatz erweitert.

Um nun den Signal- vom Rauschanteil zu trennen, also die zufälligen Messfehler der Bildpunkte von den tatsächlichen Sensordeformationen und nicht berücksichtigten Abbildungsfehlern des Aufnahmeobjektivs zu separieren, werden Krümmungsbedingungen im Korrekturgitter als Quasi-Beobachtungen eingeführt (Kraus 2000).

$$\begin{aligned} 0 &= (k_{x[i,j-1]} - k_{x[i,j]}) - (k_{x[i,j]} - k_{x[i,j+1]}) \\ 0 &= (k_{x[i-1,j]} - k_{x[i,j]}) - (k_{x[i,j]} - k_{x[i+1,j]}) \\ 0 &= (k_{y[i,j-1]} - k_{y[i,j]}) - (k_{y[i,j]} - k_{y[i,j+1]}) \\ 0 &= (k_{y[i-1,j]} - k_{y[i,j]}) - (k_{y[i,j]} - k_{y[i+1,j]}) \end{aligned} \tag{5.22}$$

Angesetzt werden die Gleichungen innerhalb des Korrekturgitters sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung. Dies führt innerhalb des Gleichungssystems zu einer neuen Gruppe von Beobachtungen. Die Genauigkeit, mit der die Gleichungen in den Ausgleichungsprozess eingeführt werden, hängt von der zu erwartenden "Rauhigkeit" der zu ermittelnden Unebenheitsparameter des Korrekturgitters sowie von der tatsächlichen Anzahl der gemessenen Bildpunkte innerhalb des Bildverbandes pro Gittersegment ab.

Gleichfalls bieten diese Gleichungen einen Schutz vor möglichen Singularitäten innerhalb des Ausgleichungssystems, die auftreten können, wenn die an einem Gitterstützpunkt beteiligten Gittersegmente keine Bildpunktmessungen enthalten sollten.



f = 18 mm f = 28 mm

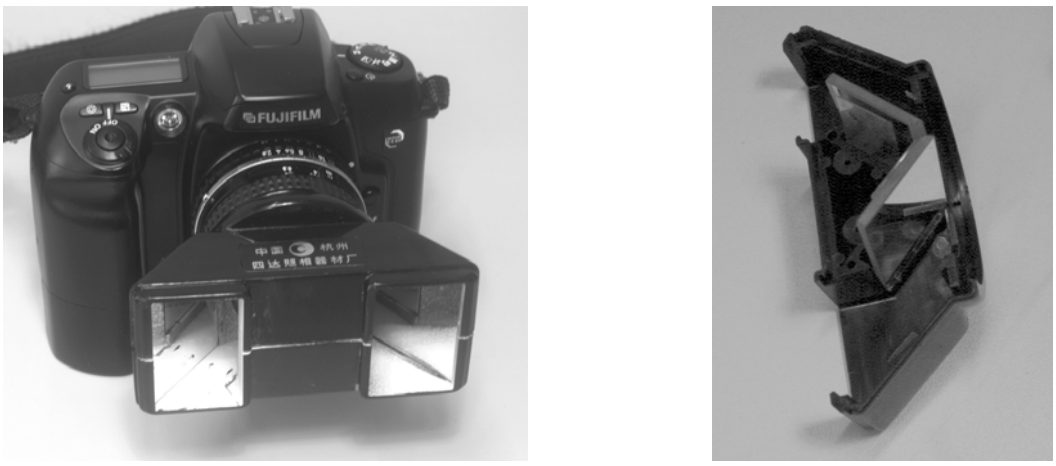
Abb. 5.13: Berechnete Korrekturgitter für eine Kamera mit verschiedenen Brennweiten

Die Leistungsfähigkeit des Verfahrens wurde in zahlreichen Untersuchungen belegt (Tecklenburg & Luhmann 2000, Hastedt et al. 2002). Exemplarisch zeigt Abb. 5.13 das im Rahmen einer Bündelausgleichung berechnete

Korrekturgitter für eine Kamera (Canon EOS1000D) mit zwei unterschiedlichen Brennweiten. Das Gitter zeigt vergleichbare Tendenzen, d.h. zusätzlich zu den simultan berechneten Verzeichnungsparametern werden Effekte im Bildraum modelliert, die in beiden Fällen einen ähnlichen Charakter aufweisen. Es ist dabei jedoch nicht unbedingt von reinen Sensordeformationen (z.B. Unebenheiten) auszugehen, sondern das Finite-Elemente-Gitter kompensiert alle über die gesamte Bildserie hinweg verbleibenden Restfehler.

Das Verfahren der Finite-Elemente-Kalibrierung eignet sich auch für die Modellierung komplexer Strahlengänge, wie sie im darauf folgenden Beispiel durch ein Stereostrahlteilersystem gegeben ist. Schließlich werden in Kap. 6 an hochgenauen Testfelduntersuchungen die Auswirkungen der Methode im Vergleich zu alternativen Modellansätzen diskutiert.

Die Kalibrierung eines Kamerasystems, das auf dem in Kap. 5.5.2 vorgestellten Prinzip der Spiegelstereostrahlteilung basiert, ist ein Beispiel für die Modellierung komplexer Strahlengänge mit unebenen optischen Elementen. Der Strahlengang einer Spiegelstereovorsatzkamera ist in Abb. 5.37 dargestellt. An die Ebenheit der verwendeten Spiegel- und Prismenflächen werden extrem hohe Anforderungen gestellt, die bis zu 1µm betragen (Luhmann 2005a). In einem Versuch mit einem handelsüblichen Stereovorsatz für Spiegelreflexkameras (Abb. 5.14) wird deutlich, dass optisch minderwertige Komponenten zu gravierenden Genauigkeitsverlusten bei der photogrammetrischen Punktbestimmung führen können.



a) Stereovorsatz an Kamera und Objektiv b) Innerer Aufbau des Stereovorsatzes

Abb. 5.14: Digitalkamera Fuji FinePix S1 Pro mit Stereostrahlteiler Stereoworld

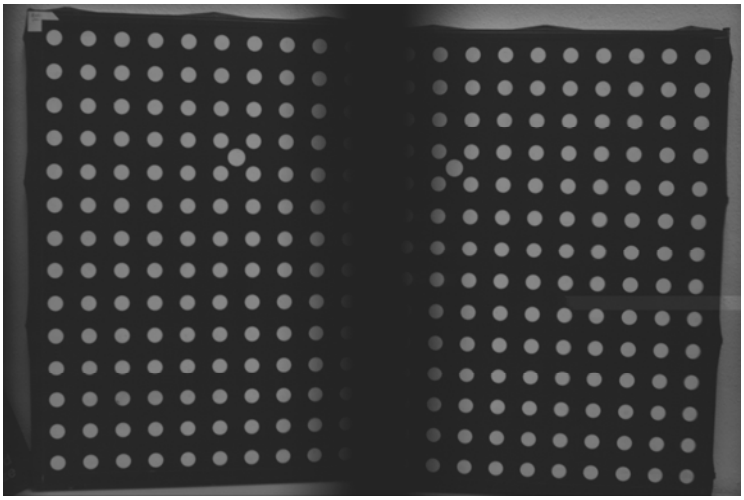


Abb. 5.15: Beispielhafte Testfeldaufnahme mit Stereovorsatz (Fuji FinePix S1)

Als Testfeld diente ein ebenes signalisiertes Punktfeld von 500mm x 500mm Größe, für das Referenzkoordinaten vorliegen (Beispielaufnahme in Abb. 5.15). Diese Testfeldkalibrierung sollte im Rahmen der Systementwicklung in Kap. 5.5.2 einen ersten Aufschluss darüber geben, ob der gewählte mathematische Ansatz für eine quasi beliebige (und qualitativ minderwertige) Vorsatzoptik funktioniert.

Die wichtigsten Kenndaten des aufgenommenen Bildverbandes sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

[mm]	Ax.Ori mit relativer Orientierung (1)	FiBun mit Autokoll.punkt (2)	FiBun ohne Spiegelvorsatz (3)
Kamerakonstante c Bildhauptpunkt (x'_0) Bildhauptpunkt (y'_0)	-29,0407 0,1308 -0,1045	28,96469 -0,0384 0,2314	29,0537 0,2791 -0,1178
A_1 A_2 A_3	1,48E-04 2.30E-07 -5.85E-10	-2,99E-04 1,84E-06 -4,73E-09	-1,41E-04 8,94E-08 1,13E-10
B_1 B_2	-7.17E-005 -0.0001246		
C_1 C_2	-0.007109 0.0003313		
Mittlere Bildmessgenauigkeit	0,005	0,0011	0,0003
RMS(X) RMS(Y) RMS(Z) RMS(XYZ)	0,056 0,050 0,115 0,080	0,018 0,018 0,035 0,043	anderes Objekt " " "
Sigma 0	0,0041	0,0016	0.0003
Relative Genauigkeit (XY)	1:12700	1:35000	
Relative Genauigkeit (XYZ)	1:8900	1:17000	

Tab. 5.3: Ergebnisse von Kamerakalibrierungen (alle Werte in mm)

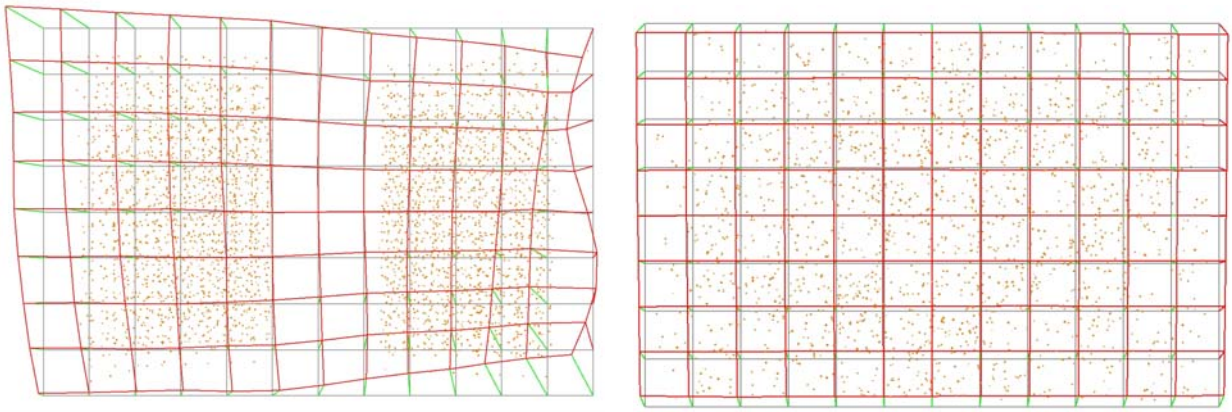
Spalte (1) bezeichnet die Ergebnisse einer herkömmlichen Bündelausgleichung (Programm Ax.Ori) mit festgehaltener relativer Orientierung zwischen beiden Bildern. Spalte (2) enthält die Ergebnisse einer Bündelausgleichung mit finiten Elemente (Programm FiBun) und zusätzlich eingeführtem Autokollimationspunkt, während Spalte (3) das Ergebnis einer Kalibrierung ohne Spiegelvorsatz beschreibt.

Die hier (Spalte 2) erreichten Genauigkeiten lassen sich nach Bildraum und Objektraum trennen. Im Bildraum liegt die mittlere Bildmessgenauigkeit bei 1.1 µm (ca. 0.15 Pixel). Dieser Wert liegt etwa um den Faktor 4 höher als bei einer Kalibrierung ohne Spiegelvorsatz (Spalte 3), d.h. die zusätzlich wirkenden optischen Komponenten führen zu einer signifikanten Verschlechterung des Ergebnisses.

Die im Objektraum erreichte Genauigkeit ist in der Testfeldebene mit ca. 20 µm etwa um den Faktor 2 besser als senkrecht dazu (35 µm). Der Grund liegt in der für ebene Punktfelder eingeschränkten Aufnahmeanordnung, da ein geeigneter Rundumverband hier nicht möglich ist. Bezogen auf die maximale Diagonale des Testfeldes ergibt sich eine relative innere Genauigkeit von 1:35 000 in der Ebene und 1:17 000 bezogen auf alle Koordinatenrichtungen.

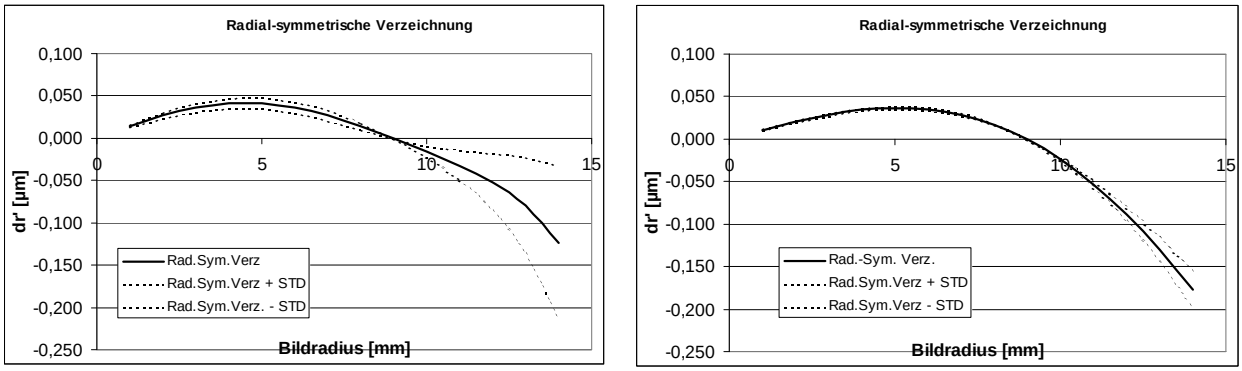
Abb. 5.16 zeigt das Sensorkorrekturmodell der Kamera. Im linken Bild wird deutlich, dass die Einflüsse des Spiegelvorsatzes zu großen unsystematischen Abweichungen im Bild führen, die ohne ein Korrekturgitter nicht kom-

pensiert werden können. Man sieht weiterhin, dass die Deformationen im linken und im rechten Teil des Sensors völlig verschieden ausfallen. Die Ursache liegt eindeutig in den Eigenschaften des Spiegelvorsatzes. Zum Vergleich zeigt das rechte Bild ein Kalibrierungsergebnis der gleichen Kamera-Objektiv-Kombination ohne Spiegelvorsatz. Sensordeformationen sind in diesem Maßstab kaum erkennbar.



a) mit Spiegelvorsatz b) ohne Spiegelvorsatz

Abb. 5.16: Berechnete Sensordeformationen (Fuji FinePix S1, 28mm Objektiv).



a) mit Spiegelvorsatz b) ohne Spiegelvorsatz

Abb. 5.17: Radial-symmetrische Verzeichnung (Fuji FinePix S1, 28mm Objektiv)

Die aus der Bündelausgleichung resultierenden Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung zeigt Abb. 5.17. Da in beiden Fällen dasselbe Objektiv verwendet worden ist, zeigen die Kurven näherungsweise den gleichen Verlauf. Mit Spiegelvorsatz (Abb. 5.17a) steigt die Unsicherheit der Verzeichnungsbestimmung (gestrichelte Linien) zum Bildrand hin an, die Verzeichnungskurve selbst zeigt einen leichten Knick. Auch hier liegt die Ursache in der mangelnden Qualität der Spiegelflächen.

Das Ergebnis lässt folgende Schlussfolgerungen zu:

- Eine Kalibrierung ist möglich, ohne dass der genaue Strahlengang mathematisch nachgebildet wird.
- Unebenheiten der Spiegel oder sonstige Bildfehler können nur durch einen gitterorientierten Ansatz erfasst werden.
- Eine Stereokamera lässt sich mit der gleichen Aufnahmekonfiguration kalibrieren wie es für Einzelkameras der Fall ist.
- Besondere Vorkehrungen im Objektraum sind nicht erforderlich.
- Die mit dem verwendeten Stereovorsatz erzielten Messgenauigkeiten liegen etwa Faktor 4 schlechter als mit einer reinen Digitalkamera.

5.2.2 Sichtstrahlkalibrierung

Die von Schulte et al. (2006) entwickelte Sichtstrahlkalibrierung basiert auf einer pixelweisen Modellierung des Abbildungsstrahlenganges ohne Berücksichtigung optischer Eigenschaften von Objektiven oder anderen optischen Bauteilen. Grundidee ist die Definition eines eigenen Sichtstrahls für jedes Pixel, der die Richtung zum zugehörigen Objektpunkt über zwei Korrekturvektoren in einer Abbildungsebene beschreibt.

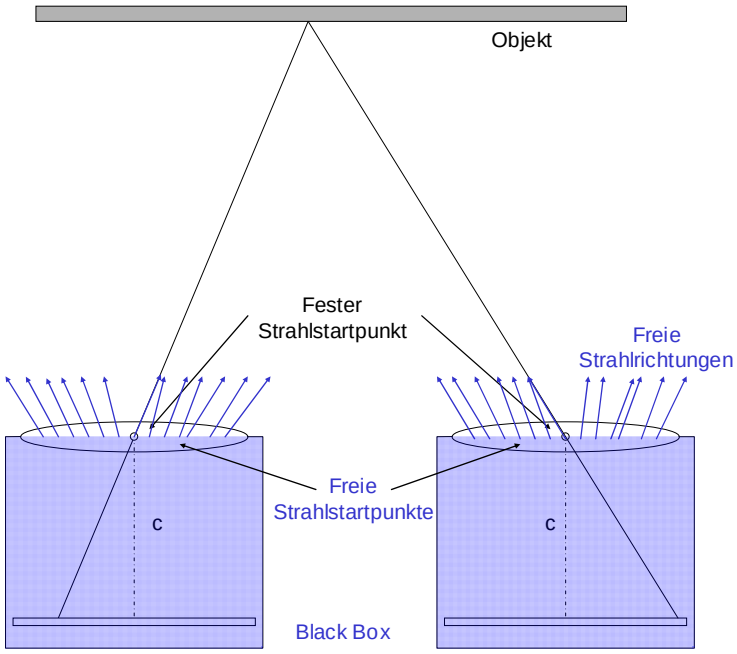
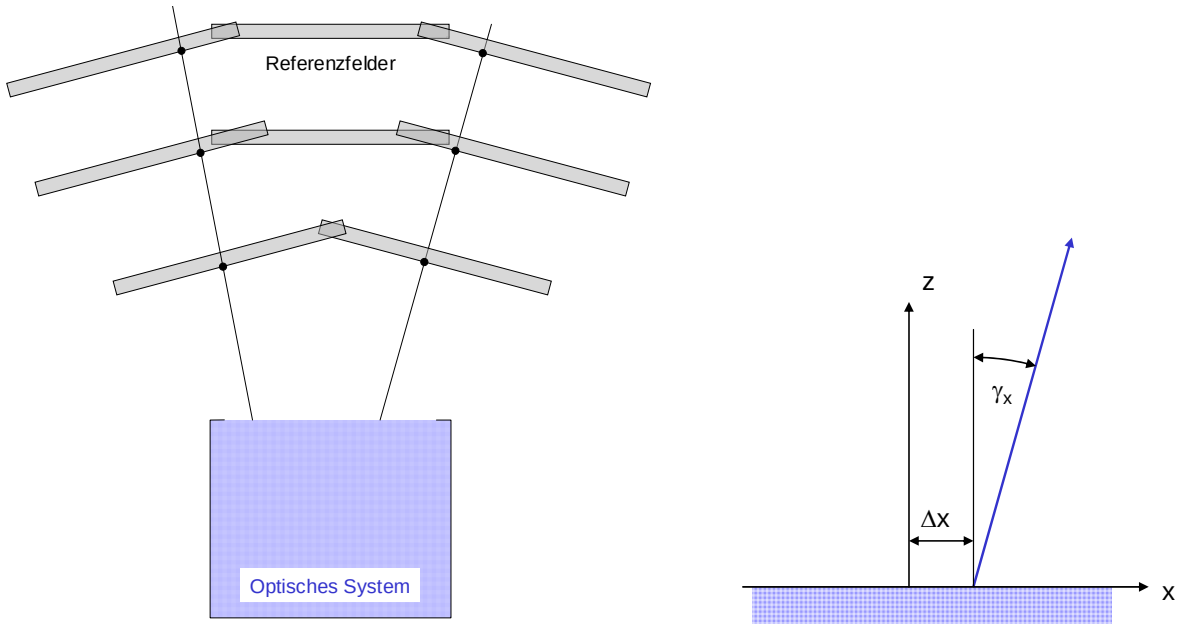


Abb. 5.18: Geometrisches Abbildungsmodell der Sichtstrahlkalibrierung (nach Schulte et al. 2006)

Ein optisches System wird dabei nicht mehr als zentralperspektives Lochkameramodell mit Bildfehler beschreibenden Funktionen angenommen, sondern quasi als unbekanntes Black-Box-System, das für jedes Pixel über frei definierbare Strahlstartpunkte und –richtungen verfügt. Prinzipiell kann jeder Punkt auf der virtuellen Abbildungsebene einen individuellen Strahlvektor besitzen, so dass somit bei geeigneter Kalibrierung sämtliche optischen und elektronischen Abbildungsfehler beschrieben werden können.

Die Bestimmung sämtlicher Strahlrichtungen ist nicht unproblematisch und erfordert ein sehr dichtes Referenzfeld im Objektraum. Dies kann z.B. dadurch erzeugt werden, dass das Referenzpunktfeld in mehreren Aufnahmeentfernungen vom optischen System aufgenommen wird (Abb. 5.19a). Wenn auf diese Weise ein dreidimensionales, das gesamte Messvolumen abdeckendes Referenzpunktfeld entsteht, wird das System vollständig kalibriert.

Um in der praktischen Durchführung ein hinreichend dichtes Punktfeld in einem Referenzfeld zu erhalten, wird ein Flachbildmonitor verwendet, auf dem ein Streifenmuster für eine Absolutphasenmessung dargestellt wird. Damit kann jeder Monitorpunkt subpixelgenau bestimmt werden. Pro Sichtstrahl werden vier Parameter ermittelt, je ein Offset Δx und Δy sowie zwei Winkel γ_x und γ_y (Abb. 5.19ab).



a) Räumlich verteilte Kalibrierebenen

b) Offset und Richtung eines Sichtstrahls am Beispiel der x-Richtung

Abb. 5.19: Sichtstrahlkalibrierung mit mehreren Referenzebenen (nach Schulte et al. 2006)

5.3 Bildvariante Kalibrierung

Die in Kap.1.4.4 geführte Diskussion zum Begriff der Kamerakonstante hat nahegelegt, bei nicht stabilen, vom Ideal der Messkamera abweichenden Kameras von einer beweglichen Lage des Projektionszentrums gegenüber der Sensorebene auszugehen. Während das Prinzip der Teilmesskameras (Wester-Ebbinghaus 1983) zwar schon davon ausging, dass in einer photogrammetrischen Kamera nur das Bildkoordinatensystem reproduzierbar definiert ist, so wurde doch im Allgemeinen von einer über eine gesamte Aufnahmesequenz hinweg stabilen inneren Orientierung ausgegangen. Mit dem Aufkommen digitaler Spiegelreflexkameras (still-video cameras) seit ca. 1990 wurden jedoch zunehmend Bildmessgenauigkeiten erreicht, die eine stabile Kamerageometrie in gleicher Größenordnung von <1µm erforderten. Erste Hinweise auf instabile Spiegelreflexdigitalkameras zeigten Shortis et al. (1998), die im Wesentlichen thermische und mechanische Veränderungen der Kamerageometrie nachweisen konnten. Läbe und Förstner (2004) weisen entsprechende Effekte bei einfachen Consumerkameras nach.

Die über einen hinreichend langen Zeitraum stabile gegenseitige Lage von Bildsensor und Objektiv ist Voraussetzung für eine Standardkalibrierung nach den mathematischen Ansätzen aus Kap. 4. Mechanische Einflüsse wie Schwerkraft, Objektivwechsel, Umfokussierung, Stöße oder Druck können bei Kameras mit herkömmlichen Gehäusen und Objektivanschlüssen zu Veränderungen der Kamerageometrie führen, die bereits von Bild zu Bild einer Aufnahmesequenz auftreten.

Thermische Einflüsse durch Umgebungstemperatur und Körperwärme des Bedieners führen je nach thermischem Ausdehnungskoeffizient des Kameragehäuses ebenfalls zu geometrischen Veränderungen, die jedoch in der Regel etwas langsamer wirken. Am Beispiel eines handelsüblichen Kameragehäuses aus Aluminium (Ausdehnungskoeffizient a=25·10^{-6}) mit einer Größe von 150 mm x 80 mm x 70 mm wird deutlich, dass sich eine Erwärmung um 1°C in einer minimalen Ausdehnung von 1.7 µm auswirkt. Für die Länge einer Kamerakonstanten von z.B. c=50 mm würde sich eine Längenänderung von 1.25µm/°C ergeben. Beide Beispielwerte überschreiten die heute erreichbaren Bildmessgenauigkeiten von ca. 0.5 µm deutlich.

5.3.1 Bildweise Variation von Kamerakonstante und Hauptpunkt

Mechanische und thermische Einflüsse können während der Aufnahme einer Bildserie dazu führen, dass die üblicherweise angenommen konstante Lage des Projektionszentrums im Kamerasystem nicht mehr gewährleistet werden kann. Mögliche Ursachen sind unterschiedlich einwirkende Schwerkrafteinflüsse (z.B. bei gekanteten Aufnahmen), Deformationen des Kameragehäuses (z.B. durch manuellen Druck oder Erwärmung), mechanische Sensorreinigungsvorgänge, Bildstabilisation oder Vibrationen der Aufnahmeplattform (z.B. ferngelenkter Hubschrauber oder Roboterarm).

Wenn die interne Kamerastabilität nicht ausreicht, um eine konstante Lage des Projektionszentrums im Bezug zum Bildkoordinatensystem sicherzustellen, kann das mathematische Abbildungsmodell zur Kamerakalibrierung um bildvariante Korrekturgrößen erweitert werden (Maas 1999a, Tecklenburg & Luhmann 2001):

$$x' = (x'_0 + dx'_i) - (c + dc_i) \cdot \frac{r_{11} \cdot (X_p - X_0) + r_{21} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{31} \cdot (Z_p - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_p - X_0) + r_{23} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_p - Z_0)} + \Delta x'_{(dc_i, dx'_i, dy'_i)} \tag{5.23}$$

$$y' = (y'_0 + dy'_i) - (c + dc_i) \cdot \frac{r_{12} \cdot (X_p - X_0) + r_{22} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{32} \cdot (Z_p - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_p - X_0) + r_{23} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_p - Z_0)} + \Delta y'_{(dc_i, dx'_i, dy'_i)}$$

mit i = 1 .. Anzahl Bilder

Die bildvarianten Korrekturgrößen dc, dx' und dy' sind kleine Verschiebungsbeträge, die eine Variation des Projektionszentrums von Bild zu Bild beschreiben. Sie werden im Rahmen der Bündelausgleichung mitgeschätzt. Die weiteren Verzeichnungs- und Sensorparameter $\Delta x', \Delta y'$ können in der Regel als konstant über eine Bildserie angenommen werden, hängen jedoch wiederum von den erweiterten Korrekturparametern ab und müssen in der Bündelausgleichung daher iterativ bestimmt werden.

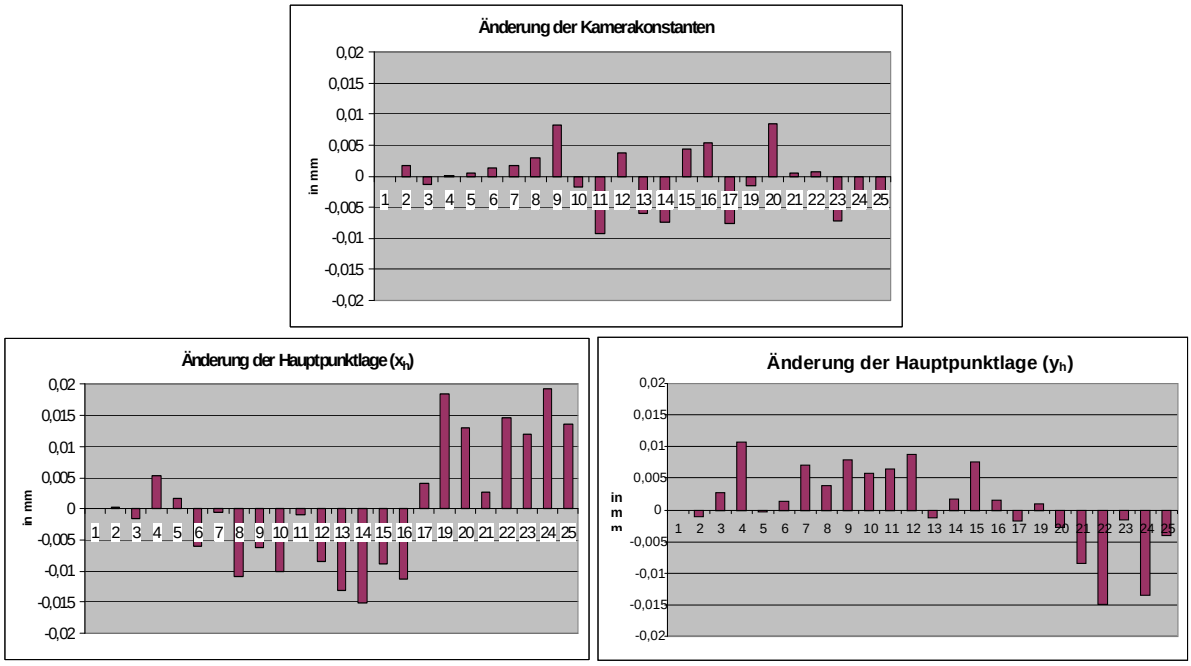


Abb. 5.20: Variation des Projektionszentrums über eine Bildserie

Beispielhaft zeigt Abb. 5.20 die in der erweiterten Bündelausgleichung berechnete Variation des Projektionszentrums für einen Bildverband. Die Bilder 1 bis 9 sind ohne Kantung, die Bilder 10 bis 17 um 90° nach rechts und

die Bilder 18 bis 25 um 90° nach links gekantet aufgenommen. Deutlich ist zu erkennen, dass gravierende Einflüsse auf die Lage des Projektionszentrums aufgetreten sind, die sich den vorgenommenen Kantungen zuordnen lassen. Die Größenordnung der Verschiebung beträgt mehr als 15 µm.

Die positiven Auswirkungen des erweiterten Modells auf die Genauigkeit im Objektraum werden in Tecklenburg et al. (2001) und Hastedt et al. (2002) dokumentiert. Weitere Auswertungen werden in Kap. 6 zusammengefasst.

5.3.2 Modellierung von Gravitationseinflüssen

Der Einfluss von Schwerkraft auf die gegenseitige Lage von Objektiv und Sensorebene wird im Ansatz von Haig et al. (2006) beschrieben und als zusätzlicher Parameter dem Modell der inneren Orientierung hinzugefügt.

Die Änderung der optischen Achse durch eine gravitationsbedingte Neigung des Objektivs wird bei horizontaler Blickrichtung der Kamera maximal und bei senkrechter Aufnahmerichtung zu Null. Je nach Konstruktion und Stabilität der Kamera kommt es bei horizontaler Aufnahmerichtung zu einer maximalen Ablenkung der optischen Achse, die mit ψ_{max} bezeichnet wird und konstant für die Kamera angenommen wird. Unter der Annahme, dass die Z-Achse des Objektkoordinatensystems in Lotrichtung zeigt, lässt sich der für ein individuelles Bild n wirkende Objektivneigungswinkel ψ_n aus der Rotationsmatrix der äußeren Orientierung ableiten:

$$\begin{aligned} r_{33} &= \cos\omega \cdot \cos\varphi = \cos\nu \\ \nu &= \arccos(r_{33}) \\ \Psi &= \Psi_{\max} \cdot \sin\nu \end{aligned} \tag{5.24}$$

Der Winkel ν bezeichnet den Winkel zwischen optischer Achse und Lotrichtung (siehe auch Schwidefsky & Ackermann 1976, Abb. 23.1 und Tab. 27.1).

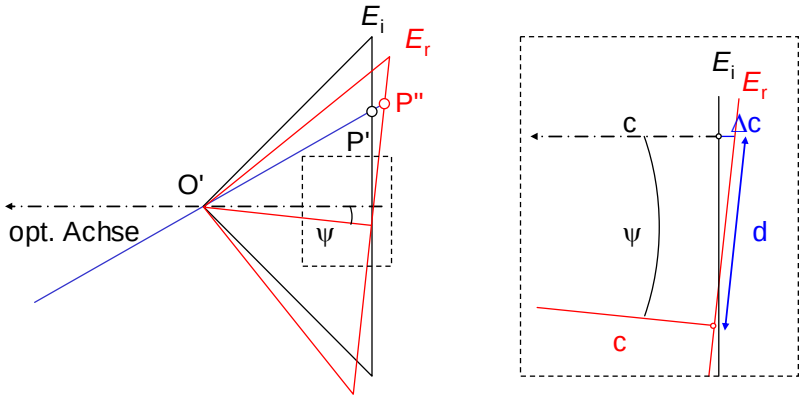


Abb. 5.21: Auswirkungen auf Kamerakonstante und Hauptpunktlage durch gravitationsbedingte Objektivkippung (nach Haig et al. 2006)

Die Neigung des Objektivs führt bei Überlagerung der realen und idealen optischen Achse im Objektraum zu einer im Vergleich zur idealen Lage der Bildebene E_i gekippten Bildebene E_r, in der es zu einem Hauptpunktversatz von d und einer affinen Verschiebung der Bildkoordinaten in Abhängigkeit der Bildkantung β kommt (Abb. 5.21):

$$\begin{aligned} d &= c \cdot \tan\alpha \\ \Delta x'_{grav} &= -\sin\kappa \cdot d \\ \Delta y'_{grav} &= \cos\kappa \cdot d \end{aligned} \tag{5.25}$$

Die Kamerakonstante ändert sich um Δc:

$$c' = \frac{c}{\cos\psi}$$
$$\Delta c = c' - c \tag{5.26}$$

Das funktionale Modell der Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung kann durch gravitationsbedingte Korrekturglieder $\Delta x'_{grav}$, $\Delta y'_{grav}$ erweitert werden, die von der individuellen äußeren Orientierung eines Bildes und der kameraspezifischen maximalen Auslenkung der optischen Achse ψ_{max} abhängen. ψ_{max} kann also im Rahmen der Ausgleichung als weitere Unbekannte des Kameramodells bestimmt werden.

$$\Delta x'_{grav} = \frac{-c \cdot (x' - \sin\beta_n \cdot \tan\psi_n \cdot c)}{-\frac{c}{\cos\psi_n} - \tan\psi_n \cdot (-\sin\beta_n \cdot x' + \cos\beta_n \cdot y' + c \cdot \tan\psi_n)}$$
$$\Delta y'_{grav} = \frac{-c \cdot (y' + \cos\beta_n \cdot \tan\psi_n \cdot c)}{-\frac{c}{\cos\psi_n} - \tan\psi_n \cdot (-\sin\beta_n \cdot x' + \cos\beta_n \cdot y' + c \cdot \tan\psi_n)} \tag{5.27}$$

Gleichung (5.27) stellt den Korrekturterm für die im Bild n gemessenen hauptpunktbezogenen Bildkoordinaten dar. Hierbei wird die Kameraorientierung β mit Hilfe der Rotationsmatrixwerten r_{31}, r_{32} berechnet und beschreibt die individuelle Bilddrehung um die optische Achse. Die Bildkoordinaten x', y' werden mit β in ein lokales Koordinatensystem gedreht, so dass die schwerkraftabhängige Korrektur in Abhängigkeit des Winkels ψ_n immer in Z-Richtung des Objektkoordinatensystems angebracht werden kann.

Haig et al. (2006) zeigen Genauigkeitssteigerungen durch die Einführung eines gravitationsabhängigen Parameters, die je nach verwendeter Kamera und Bildanordnung (Anzahl der gekanteten Aufnahmen) zwischen 7% und 45% betragen. Die Ergebnisse basieren auf rechnerischen Simulationen typischer Mehrbildverbände.

5.4 Besondere Objektivformen

5.4.1 Objektive mit variabler Brennweite

Objektive mit variabler Brennweite werden als Vario- oder Zoomobjektive bezeichnet und gestatten die freie Wahl des Öffnungswinkels innerhalb eines verfügbaren Brennweitenbereiches. Da eine variable Brennweite aufgrund der Linsengleichung (3.9) zu einer veränderten Bildweite führt und demzufolge auch zu einer veränderten Kamerakonstanten, werden sie in der Photogrammetrie nur in Ausnahmefällen eingesetzt. Wird das Vario-Objektiv während einer Aufnahmeserie mechanisch fixiert und das Aufnahmesystem simultan kalibriert, kann es wie ein herkömmliches Objektiv verwendet werden. Die Vorteile der freien Brennweitenwahl gehen dann allerdings verloren.

Der beispielhafte Aufbau eines Vario-Objektivs ist in Abb. 5.22 dargestellt. Es besteht aus einer Linsengruppe, die die Änderung der Brennweite vornimmt, während eine zweite Gruppe für die Scharfabbildung sorgt. Beide Linsengruppen sind mechanisch gekoppelt und werden bei einer Änderung der Brennweite bewegt.

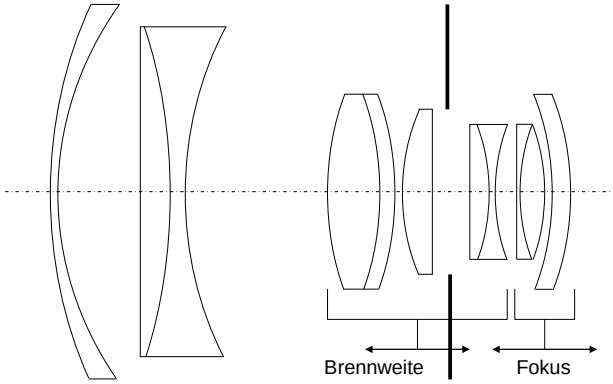


Abb. 5.22: Prinzipieller Aufbau eines Vario-Objektivs (nach Marchesi 1985)

Die Änderung der Brennweite führt folglich unmittelbar zu einer Änderung der Kamerakonstanten. Da sich die räumliche Lage des Projektionszentrums durch mechanische Toleranzen ebenfalls ändert, variiert auch die Lage des Bildhauptpunktes. Schließlich ändern sich die relativen Positionen der Linsen zueinander und damit sämtliche Verzeichnungseffekte.

Grundlegende Arbeiten zur Kalibrierung von Vario-Objektiven zeigen Fraser (1980), Fryer (1986) oder Wiley & Wong (1995). Fryer (1996) dokumentiert große brennweitenabhängige Variationen von radial-symmetrischer und tangentialer Verzeichnung, die Zoom-Objektive für die praktische Photogrammetrie nur begrenzt einsetzbar machen.

In Digitalkompaktkameras werden heute überwiegend Vario-Objektive eingesetzt. Diese Kameras haben durch ihre rasante Verbreitung auch Einzug in die Nahbereichsphotogrammetrie gehalten, z.B. bei Anwendungen reduzierter Genauigkeit (Unfallaufnahmen, Gebäudemodellierung). Fraser und Al-Ajlouni (2006) untersuchen die Möglichkeit zur Interpolation der Parameter der inneren Orientierung in durch Vorabkalibrierung bestimmten Parametersätzen für Consumerkameras. Aufgrund der systematischen Änderung der Kameraparameter mit Änderung der Zoomeinstellung können dabei Kamerakonstante und Hauptpunktkoordinaten linear interpoliert werden. Der erste Verzeichnungsparameter K_1 (siehe Gl. 4.20) kann durch eine exponentielle Funktion bestimmt werden:

$$K_1^{(c_i)} = d_0 + d_1 c_i^{d_2} \tag{5.28}$$

Dabei stellen c_i die Kamerakonstante in einer Zoomstellung i dar und d_2 einen Exponenten, der in einem Bereich von -0.2 bis -3.1 angesetzt wird. Da in dem von Fraser und Al-Ajlouni beschriebenen Anwendungsfeld keine höchsten Messgenauigkeiten verlangt werden, wird auf eine Modellierung der Verzeichnungskoeffizienten K_2 und K_3 sowie Parameter der tangentialen Verzeichnung verzichtet. Die Autoren zeigen das Potential der Methode auf für solche Anwendungen, in denen gemischte Aufnahmen mit beliebigen Zoomstufen eingesetzt werden. Die relative Genauigkeit der untersuchten Kameras und Aufnahmekonfigurationen liegt dabei in der Größenordnung von 1:15 000.

Shortis et al. (2006) vergleichen Fixfokus- und Zoomobjektive an identischen Digitalspiegelreflexkameras. Sie weisen hohe Instabilitäten von Zoom-Objektiven nach, die auch nach Einführung bildvarianter Korrekturfunktionen nicht vollständig erfasst werden. Der Genauigkeitsverlust gegenüber Fixfokusobjektiven beträgt bis zu 72% in der inneren Genauigkeit und bis zu 44% in der äußeren Genauigkeit.

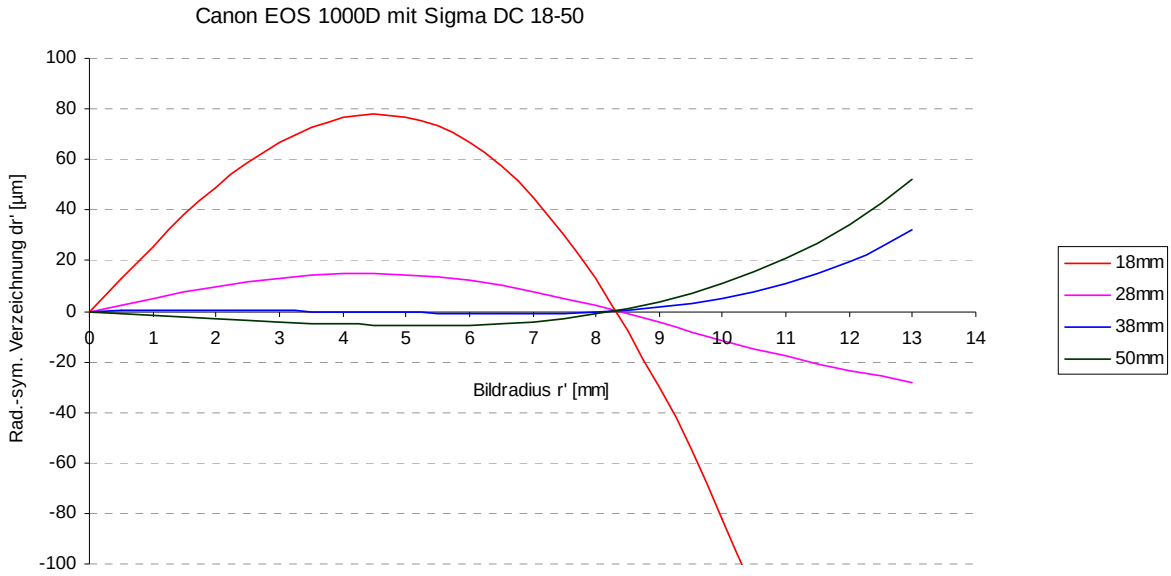
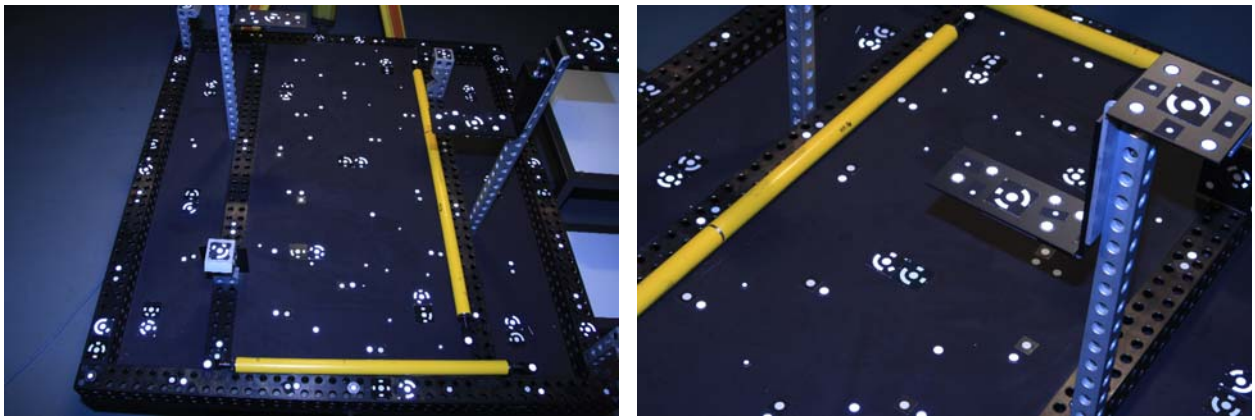


Abb. 5.23: Variation der radial-symmetrischen Verzeichnung bei verschiedenen Brennweiten eines Vario-Objektivs (Canon EOS 1000D mit Sigma DC 18-50 mm)

Im Rahmen einer Standardkalibrierung einer Digitalkamera vom Typ Canon EOS 1000D mit einem Vario-Objektiv Sigma DC 18-50 mm können die oben diskutierten Ergebnisse prinzipiell bestätigt werden. Abb. 5.23 zeigt den Verlauf der radial-symmetrischen Verzeichnung in den Brennweitenstufen 18 mm, 28 mm, 38 mm und 50 mm. Aufgrund der internen Verschiebung von Linsen kommt es zwischen 18 mm und 28 mm zu einer Umkehrung zwischen kissen- und tonnenförmiger Verzeichnung. In der kürzesten Brennweiteneinstellung besitzt das Objektiv Verzeichnungswerte von bis zu 80 µm im Radius von ca. 4.5 mm und bis über 250 µm in den Bildecken. Die Auswirkung im Bild ist mit dem Auge erkennbar (Abb. 5.24).



a) f = 18mm b) f = 50mm

Abb. 5.24: Beispielhafte Testfeldaufnahmen zur Kalibrierung eines Vario-Objektivs (Canon EOS 1000D mit Sigma DC 18-50 mm)

Die in den einzelnen Bündelausgleichungen mit herkömmlicher Parametrisierung erzielten Ergebnisse werden in Tab. 5.4 zusammengefasst. Die 35mm-Einstellung ergibt die schlechteste Messgenauigkeit, ohne dass hierfür zunächst eine Erklärung gefunden werden kann. Die 50mm-Einstellung führt zu den besten Objektpunktgenauigkeiten, verursacht offenbar durch den günstigeren Bildmaßstab. Mit einer mittleren Bildmessgenauigkeit von ca. 1 µm bleibt das Ergebnis weit hinter den Erwartungen zurück. Erst die in Kap. 6.3 vorgestellte Verfeinerung des Abbildungsmodells erbringt eine deutliche Genauigkeitssteigerung für alle Zoomeinstellungen in diesem Bilddatensatz.

Brennweite	**18 mm**	**28 mm**	**38 mm**	**50 mm**
Kamerakonstante [mm]	-17.9627	-27.2744	-34.5896	-46.3925
Bildhauptpunkt x'_0 [mm]	-0.1658	-0.1233	-0.0915	-0.1236
Bildhauptpunkt y'_0 [mm]	-0.0056	0.0043	0.0604	0.0252
A_1	-4.3877e-004	-9.5534e-005	-1.5829e-005	1.2672e-005
A_2	1.2140e-006	5.9472e-007	1.5609e-007	1.8064e-007
A_3	-8.2025e-010	-1.1513e-009	2.2948e-010	-3.2026e-010
B_1	5.5726e-006	8.5431e-006	7.0770e-006	3.1204e-006
B_2	-2.8939e-006	1.0777e-005	6.7204e-006	2.2956e-006
C_1	-1.8413e-005	1.6719e-004	2.6738e-004	2.2184e-004
C_2	4.6551e-005	-3.1153e-005	5.0007e-005	1.7263e-005
Bildmessgenauigkeit [mm]	0.0009	0.0009	0.0011	0.0008
RMS Objektkoordinaten [mm]	0.0164 0.0183 0.0235	0.0149 0.0153 0.0211	0.0195 0.0198 0.0259	0.0122 0.0126 0.0157

Tab. 5.4: Ergebnisse der Kalibrierung eines Vario-Objektivs (Canon EOS 1000D, Sigma 18-50mm)

Abb. 5.25 zeigt die Variation des kalibrierten Bildhauptpunktes. Von der kürzesten bis zur längsten Brennweiteneinstellung bewegt sich der Bildhauptpunkt in x'-Richtung stetig weiter, in der y'-Richtung bis auf die 38mm-Einstellung ebenfalls. Die Verschiebung der Linsengruppen erfolgt also relativ glatt in den entsprechenden mechanischen Führungen des Objektivs und lässt sich durch Kalibrierung des Hauptpunktes rechnerisch nachweisen.

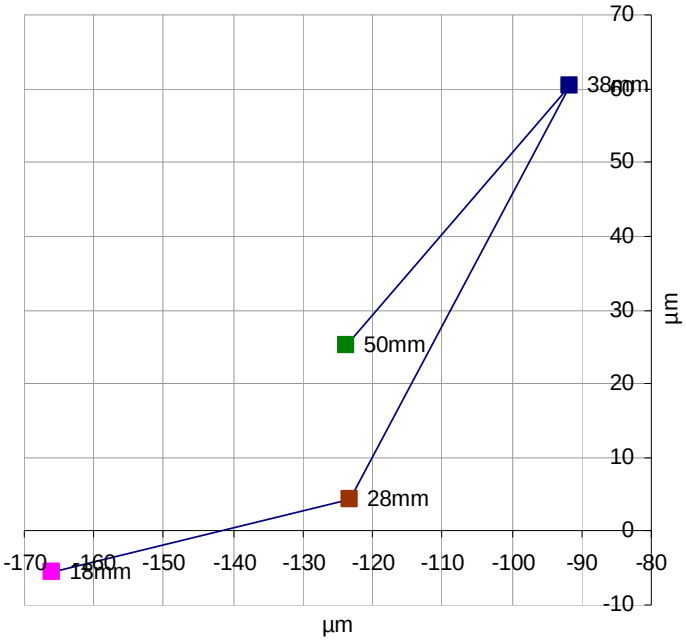


Abb. 5.25: Variation des Bildhauptpunktes bei verschiedenen Brennweiten eines Vario-Objektivs (Canon EOS 1000D mit Sigma DC 18-50 mm)

5.4.2 Objektive mit großen Öffnungswinkeln

5.4.2.1 Abbildungsmodelle für Fisheye-Objektive

In der Nahbereichsphotogrammetrie werden überwiegend kurzbrennweitige Objektive mit großen Öffnungswinkeln bevorzugt, da sie in der Regel zu kürzeren Aufnahmedistanzen, größerer Objektabdeckung und damit verbunden günstigeren Strahlenschnitten führen. Weitwinkelobjektive werden mit Öffnungswinkeln bis zu ca. 60-75° angeboten. Objektive mit größeren Öffnungswinkeln werden als Über- oder Superweitwinkel- (ca. 80-120°) und Fischaugenobjektive (bis 180°) bezeichnet. Letztere bilden die Übergangsstufe zu sphärischen Objektiven, die über Kugellinsen Öffnungswinkel bis zu 330° besitzen.

In der Regel steigt mit zunehmendem Öffnungswinkel der Effekt der radial-symmetrischen Verzeichnung. Abb. 5.26 zeigt beispielhafte Aufnahmen mit Objektiven unterschiedlicher Brennweite und Öffnungswinkel. Für einige Objektive ist die Verzeichnung deutlich sichtbar, wobei hier das 15mm-Objektiv die größte Verzeichnung aufweist. Sie kann in den Bildecken Eigenschaften annehmen, die mit den in Kap. 4.2.1 beschriebenen Polynomen nicht mehr modellierbar sind.

a) f = 14 mm b) f = 15 mm c) f = 20 mm

Abb. 5.26: Abbildung mit unterschiedlichen Weitwinkelobjektiven

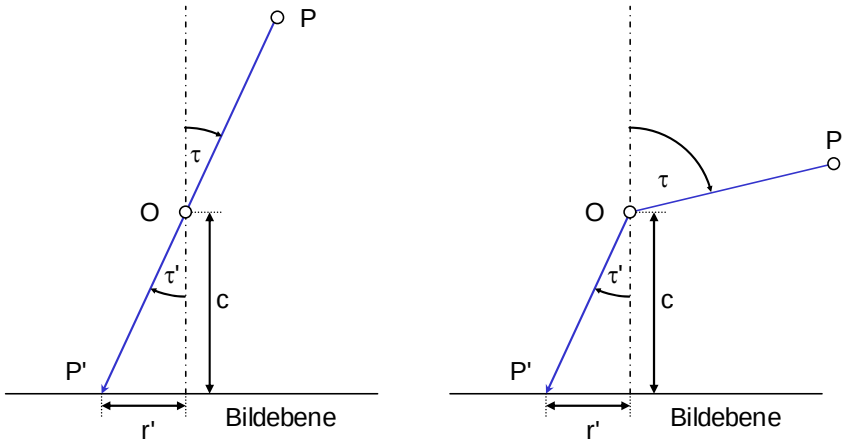


Abb. 5.27: Zentralperspektive (links) und Fisheye-Abbildung (rechts) (nach Schneider 2008)

Die photogrammetrische Abbildung durch Fisheye-Objektive wurde intensiv untersucht (Hellmeier 1983, Robson et al. 1999, Schneider 2008). Öffnungswinkel bis zu 180° lassen sich durch geeignete sphärische Objektive erzeugen, die nicht mehr der zentralperspektiven Abbildung genügen und dabei deutlich voneinander abweichende objekt- und bildseitige Bildwinkel erzeugen (Abb. 5.27). Je nach optischem Design bilden Fisheye-Objektive äquidistant, raumwinkelgleich, orthographisch oder stereographisch ab. Am Beispiel der raumwinkelgleichen Abbildung, die typisch für Vollformat-Fisheye-Objektive ist, können die Abbildungsgleichungen wie folgt angegeben werden (Hellmeier 1983, Schneider 2008, Schneider et al. 2009):

$$r' = c \cdot \tau \tag{5.29}$$

Durch Transformation der Objektkoordinaten X,Y,Z in das Kamerakoordinatensystem x,y,z mit

$$\mathbf{x} = \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \tag{5.30}$$

kann der objektseitige Einfallwinkel bestimmt werden:

$$\tan \tau = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \tag{5.31}$$

Unter Berücksichtigung der Proportion

$$\frac{x'}{y'} = \frac{x}{y} \tag{5.32}$$

erhält man die Grundbeziehungen zwischen Objektraum und Bildraum:

$$x' = \frac{r'}{\sqrt{\left(\frac{y}{x}\right)^2 + 1}} \qquad y' = \frac{r'}{\sqrt{\left(\frac{x}{y}\right)^2 + 1}} \tag{5.33}$$

Für die raumwinkelgleiche Abbildung ergeben sich dann die um Bildhauptpunkt und Korrekturparameter erweiterten Abbildungsgleichungen:

$$\begin{aligned} x' &= 2c \frac{\sin\left(\frac{1}{2}\arctan\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{y}{x}\right)^2 + 1}} + x'_0 + \Delta x' \\ y' &= 2c \frac{\sin\left(\frac{1}{2}\arctan\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{x}{y}\right)^2 + 1}} + y'_0 + \Delta y' \end{aligned} \tag{5.34}$$

Somit stellen die Gleichungen (5.34) Beobachtungsgleichungen für eine Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung dar. Schneider (2008) und Schneider et al. (2009) weisen die praktische Anwendbarkeit des Modells für die photogrammetrische Kamerakalibrierung und Objektrekonstruktion nach und zeigen Möglichkeiten auf, Fisheye-Objektive zusammen mit anderen Sensoren (Panoramakameras, terrestrische Laserscanner) einzusetzen.

5.4.2.2 Winkelabhängige Verzeichnungskorrektur

Die Berechnung des Bildradius nach dem zentralperspektiven Modell erfolgt durch den Tangens des Bildwinkels:

$$r' = c \cdot \tan \tau \tag{5.35}$$

Im Vergleich zur raumwinkelgleichen Abbildung nach Gl. (5.29) ergibt sich ein Radiusunterschied von

$$\Delta r' = c \cdot \tan \tau - c \cdot \tau \tag{5.36}$$

der bei Objektiven mit großem Öffnungswinkel zum Bildrand hin erhebliche Werte annehmen kann. So zeigt Abb. 5.28 den Verlauf von $\Delta r'$ für das nachfolgend beschriebene Objektiv. Mit zunehmendem Radius wird der Kurvenlauf immer steiler, so dass die radiusabhängige Verzeichnungskorrektur immer unsicherer wird. Je mehr sich ein Objektiv der Fisheye-Abbildung nähert, desto sinnvoller ist eine winkelabhängige Formulierung der Abbildungsfunktion und der Bildfehler beschreibenden Funktionen.

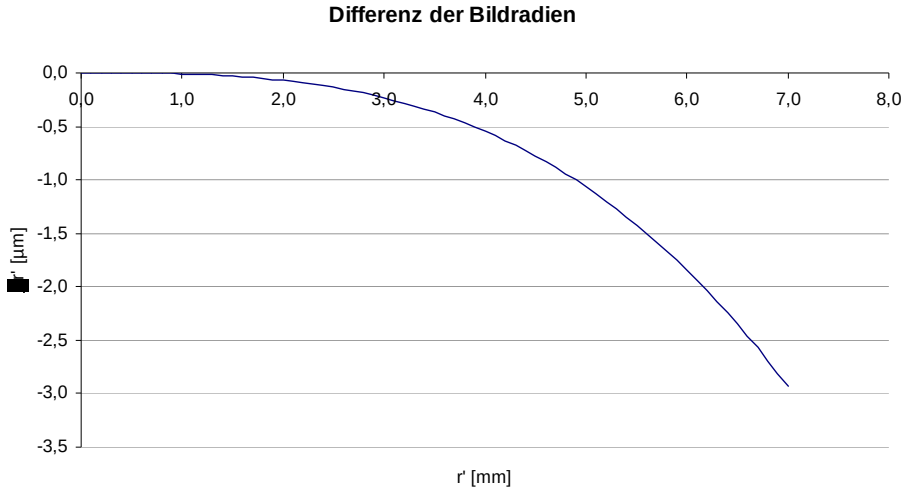


Abb. 5.28: Differenz der Bildradien nach Gl. (5.36)

Die bildkoordinatenabhängige Korrektur der radial-symmetrischen Verzeichnung nach Gl. (4.18ff) kann auch als Funktion des Abbildungswinkels formuliert werden (Robson et al. 1999):

$$\Delta r = W_1\theta^2 + W_2\theta^3 + W_3\theta^4 + ... + W_i\theta^{i+1} \tag{5.37}$$

mit

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{x'^2 + y'^2}}{c}\right)$$

θ : Winkel zwischen optischer Achse (Aufnahmerichtung) und Objektpunkt
x', y' : verzeichnungsfreie Bildkoordinaten, Projektion des Objektpunktes ins Bild
c : Kamerakonstante

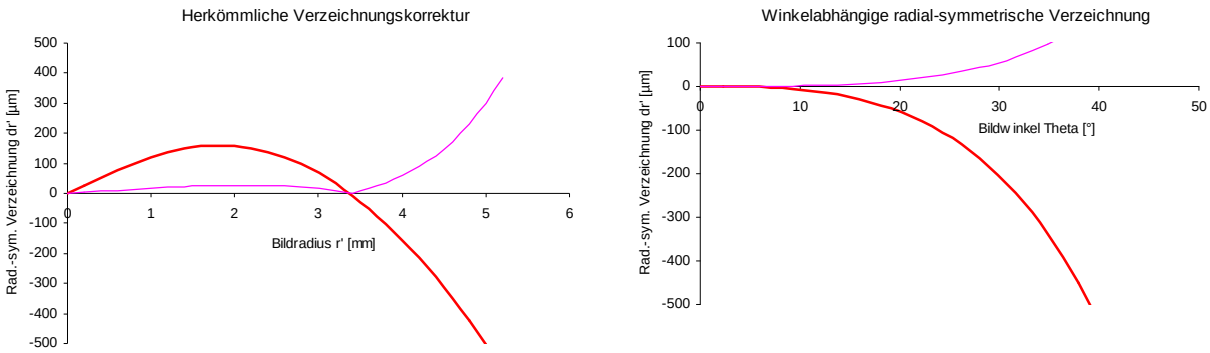
Das winkelabhängige Verzeichnungsmodell eignet sich besonders bei zentralperspektiven Optiken mit großer radial-symmetrischer Verzeichnung (Beispiele in Abb. 5.29). In einer Untersuchung eines Videoobjektivs f = 4.8 mm wurde der winkelabhängige Ansatz mit einer herkömmlichen Formulierung der radial-symmetrischen Verzeichnung verglichen.

a) Maßstab in Bildmitte b) Maßstab hinten am Bildrand c) Maßstab vorne am Bildrand

Abb. 5.29: Abbildung mit einem stark verzeichnenden Weitwinkelobjektiv

Parameter	**AICON 3D Studio**	**St. abw.**	**FiBUN**	**St. abw.**
Anzahl Bilder	56		28	
Kamerakonstante [mm]	-4.2977	0.0007	-4.8816	0.0022
Bildhauptpunkt x'_0 [mm]	-0.0547	0.0006	-0.0544	0.0006
Bildhauptpunkt y'_0 [mm]	0.0951	0.0008	0.09430	0.0010
r_0 [mm]	3.3669		0.0000	
A_1 W_1	-1.50355e-002	1.32155e-005	-0.10717	2.6126e-02
A_2 W_2	3.31438e-004	1.14683e-006	-0.46010	0.11913
A_3 W_3	-4.23359e-006	3.1364e-008	-2.47874	0.25355
W_4			3.08848	0.25595
W_5			-2.22289	9.82445e-02
B_1	1.66321e-004	2.62577e-006	9.05637e-05	3.39247e-06
B_2	4.07299e-006	3.91125e-006	-5.06107e-07	5.56862e-06
C_1	-3.50635e-005	2.93574e-005	-4.83140e-05	2.67329e-05
C_2	-2.42441e-004	2.68779e-005	-1.23195e-04	2.38405e-05
Längenmessabweichung [mm]	0.48		0.28	

Tab. 5.5: Ergebnisse der Kalibrierung eines stark verzeichnenden Weitwinkelobjektivs



a) als Funktion des Bildradius b) als Funktion des Bildwinkels

Abb. 5.30: Radial-symmetrische Verzeichnung

Der Vergleich zwischen den Ergebnissen mit herkömmlichem Ansatz (AICON 3D Studio) und der am IAPG entwickelten Bündelausgleichung FiBun mit winkelabhängiger Verzeichnungsfunktion ergibt die in Tab. 5.5 zusammengestellten Parameter. Der Parameter A_1 zeigt mit -1.5e-02 die große radial-symmetrische Verzeichnung, die in den Ecken Beträge von mehr als 1 mm annimmt und nicht mehr sinnvoll mit dem in Kap. 4.2.4 erläuterten Ansatz der iterativen Verzeichnungskorrektur zu beschreiben ist. Die winkelabhängige Verzeichnungskorrektur erfolgt mit fünf Parametern W_i nach Gl. (5.37), siehe Abb. 5.30. Die durchweg höheren Standardabweichungen im winkelbasierten Ansatz erklären sich durch die geringere Anzahl der Bilder, die aus programmtechnischen Gründen von 56 auf 28 reduziert werden musste. Der verwendete winkelbasierende Verzeichnungsansatz führt zu einer deutlichen Verbesserung der Längenmessabweichung.

5.5 Aufnahmesysteme mit besonderen Strahlengängen

5.5.1 Panoramakameras

Panoramaphotogrammetrie ist ein spezielles Feld der Nahbereichsphotogrammetrie, in dem zylinder- oder kugelförmig abbildende Aufnahmesysteme anstelle der herkömmlichen zentralperspektiven Kameras verwendet werden. Panoramabilder werden durch spezielle Zeilenscanner oder durch Mosaikbildung (stitching) sich überlappender Einzelaufnahmen erzeugt. Im Folgenden werden die grundlegenden Abbildungsgleichungen zusammengestellt, die für Aufgaben der Kalibrierung, Orientierung und Objektrekonstruktion genutzt werden. Ausführliche Herleitungen können der weiterführenden Literatur entnommen werden, z.B. Schneider (2008), Luhmann et al. (2006), Luhmann & Tecklenburg (2004), Schneider & Maas (2003), Chapman & Kotowski (2000).

a) Rotationszeilenscanner KST EyeScan

b) Digitalkamera auf Panoramaadapter

Abb. 5.31: Aufnahmesysteme zur Herstellung zylindrischer Panoramabilder

5.5.1.1 Zylindrisches Abbildungsmodell

Die am häufigsten verwendeten Methoden der Panoramaphotogrammetrie basieren auf einem zylindrischen Abbildungsmodell. Diesem Modell entsprechen die meisten analogen und digitalen Panoramakameras bzw. Rechenprogramme. Unter der Annahme einer horizontalen Abtastung besitzt das Panoramabild nur in der vertikalen Bildrichtung zentralperspektive Eigenschaften.

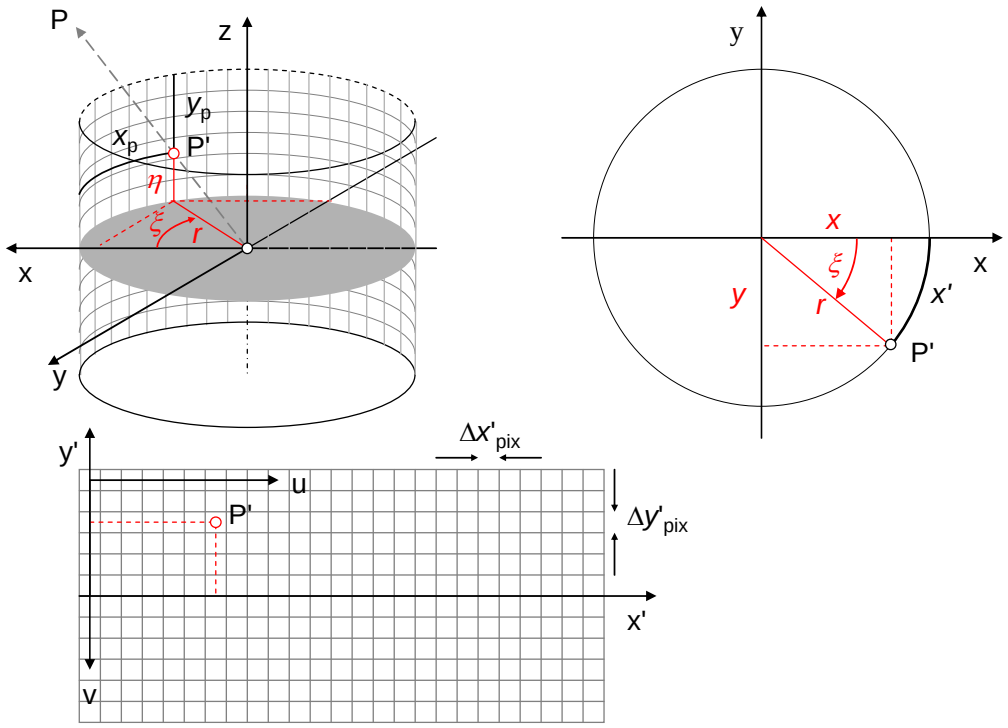


Abb. 5.32: Koordinatensysteme im zylindrischen Panorama

Ein Bildpunkt P' wird entweder durch seine Zylinderkoordinaten r,ξ,η oder durch seine kartesischen Panoramakoordinaten x,y,z festgelegt (Abb. 5.32). Dabei wird angenommen, dass das Panorama im Uhrzeigersinn aufgezeichnet wird, wenn man von oben auf das Panorama blickt. Die metrischen Bildkoordinaten x',y' und die Pixelkoordinaten u,v werden in der in eine Ebene abgerollten Panoramafläche definiert.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot \cos\xi \\ -r \cdot \sin\xi \\ \eta \end{bmatrix} \tag{5.38}$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot \xi \\ z \end{bmatrix} \tag{5.39}$$

Das ebene digitale Panoramabild besitzt n_C Spalten und n_R Zeilen bei einer Pixelauflösung von $\Delta x'_P$ und $\Delta y'_P$. Der Umfang des Panoramas beträgt somit $n_C \cdot \Delta x'_P$ bei einer Bildhöhe von $n_R \cdot \Delta y'_P$. Der Radius des digitalen Panoramabildes ist im Idealfall gleich der Kamerakonstanten des Aufnahmesystems. Er kann aus dem Umfang oder der horizontalen Winkelauflösung $\Delta\xi$ berechnet werden.

$$r = \frac{n_C \cdot \Delta x'_P}{2\pi} = \frac{\Delta x'_P}{\Delta\xi} \tag{5.40}$$

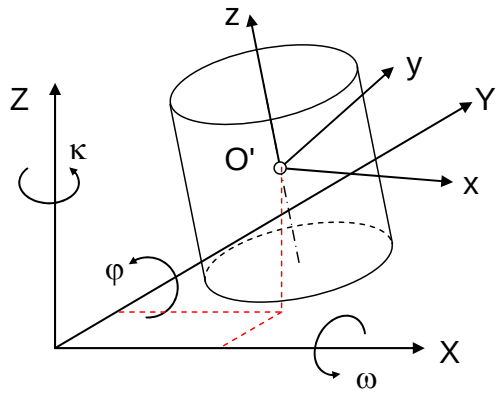


Abb. 5.33: Äußere Orientierung eines zylindrischen Panoramas

Führt man die Parameter der äußeren Orientierung ein, kann die Transformation zwischen dem Objektkoordinatensystem XYZ und dem Panoramakoordinatensystem xyz (Abb. 5.33) angegeben werden durch:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \frac{1}{\lambda}\mathbf{R} \cdot \mathbf{x} \tag{5.41}$$

Durch Umformung erhält man

$$\begin{aligned}
&\mathbf{x} = \lambda \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \\
&x = \lambda \cdot [r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)] = \lambda \cdot \overline{X} \\
&y = \lambda \cdot [r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)] = \lambda \cdot \overline{Y} \\
&z = \lambda \cdot [r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)] = \lambda \cdot \overline{Z}
\end{aligned} \tag{5.42}$$

wobei $\overline{X}, \overline{Y}, \overline{Z}$ ein Hilfskoordinatensystem parallel zum Panoramasystem definiert. Mit dem Maßstabsfaktor

$$\lambda = \frac{r}{\sqrt{\overline{X}^2 + \overline{Y}^2}} \tag{5.43}$$

ergeben sich die Bildkoordinaten im ebenen abgerollten Panoramabild durch

$$\begin{aligned}
&x' = r \cdot \arctan\left(\frac{\overline{X}}{\overline{Y}}\right) - \Delta x' \\
&y' = y'_0 + \lambda \cdot \overline{Z} - \Delta y'
\end{aligned} \tag{5.44}$$

oder direkt als Kollinearitätsgleichungen zwischen Objektkoordinaten und Bildkoordinaten:

$$\begin{aligned}
&x' = r \cdot \arctan\left(\frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}\right) - \Delta x' \\
&y' = y'_0 + \lambda \cdot \left[r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)\right] - \Delta y'
\end{aligned} \tag{5.45}$$

Hier beschreibt y'_0 die Verschiebung des Bildhauptpunktes in y-Richtung und $\Delta x', \Delta y'$ Korrekturparameter für potenzielle Abbildungsfehler der Kamera.

Die Pixelkoordinaten *u,v* des digitalen Panoramabildes sind dann gegeben durch:

$$u = \frac{x'}{\Delta x'_{pix}}$$
$$v = \frac{n_R}{2} - \frac{y'}{\Delta y'_{pix}} \tag{5.46}$$

Die Kollinearitätsgleichungen für Panoramabilder können wie die herkömmliche photogrammetrischen Abbildungsgleichungen für die Berechnungen räumlicher Vorwärtsschnitte, räumlicher Rückwärtsschnitte, der Bündeltriangulation oder der Ableitung von Orthophotos verwendet werden (Schneider 2008, Luhmann et al. 2006).

5.5.1.2 Kalibrierung von Panoramakameras

Panoramamosaike aus zentralperspektiven Einzelbildern

Die korrekte Berechnung eines Panoramas aus mehreren Einzelbildern, die mit einer um die Stehachse gedrehten herkömmlichen Kamera gewonnen werden, setzt zwei Bedingungen voraus:

1. das Drehzentrum der Kamera muss mit dem Projektionszentrum zusammenfallen;

2. die innere Orientierung der Kamera muss vollständig kalibriert sein.

Zur Erfüllung der ersten Bedingung ist es günstig, die Kamera auf einen justierbaren Panoramaadapter zu setzen, der eine Verschiebung der Kamera entlang der optischen Achse zulässt (Abb. 5.31b). Diese Verschiebung kann durch einfache Hilfsmittel durchgeführt werden, z.B. durch die Beobachtung von zwei Zielpunkten, die zusammen mit dem Drehzentrum eine gemeinsame Gerade bilden (Abb. 5.34). Bei korrekter Justierung werden die Objektpunkte in einem gemeinsamen Bildpunkt abgebildet (Jacobs 2004). Wenn im Idealfall die Drehachse und das optische Projektionszentrum zusammenfallen, besitzt das resultierende Panorama dieselben zentralperspektiven Eigenschaften wie ein übliches Bild, jedoch mit einem horizontalen Öffnungswinkel von bis zu 360°. Bei einem verbleibenden Restfehler der Justierung bewegt sich das optische Projektionszentrum in einem Kreis um die Drehachse. In der Panoramafotografie wird das Projektionszentrum auch als Nodalpunkt bezeichnet.

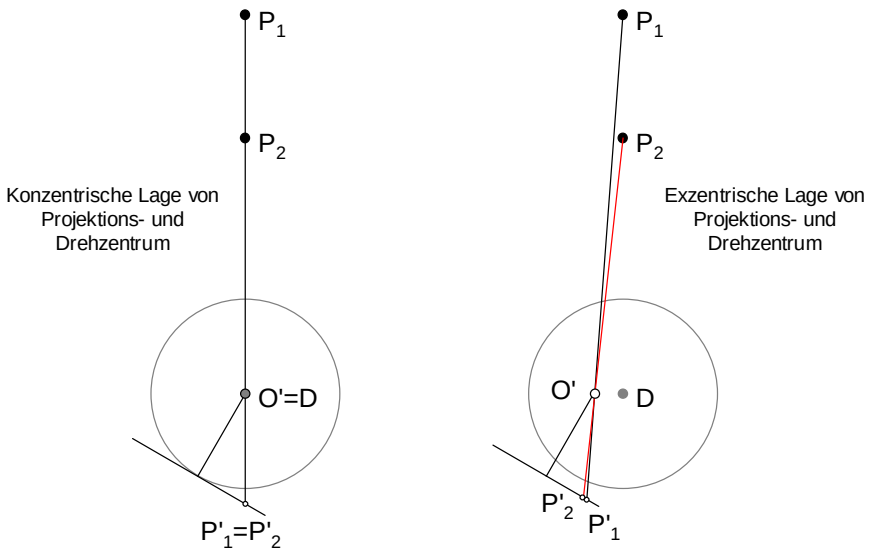


Abb. 5.34: Justierung von Projektions- und Drehzentrum durch Beobachtung kollinearer Punkte

Die zweite Bedingung kann durch eine unabhängige, voran durchgeführte Kamerakalibrierung erfüllt werden. Durch Kenntnis des vollständigen Kameramodells kann anschließend ein verzeichnungsfreies Gesamtpanorama hergestellt werden.

Unter Erfüllung der beiden genannten Bedingungen entsteht ein Panoramabild, das keine Restfehler in den Überlappungsbereichen der Einzelbilder aufweist (Beispiel in Abb. 5.35).

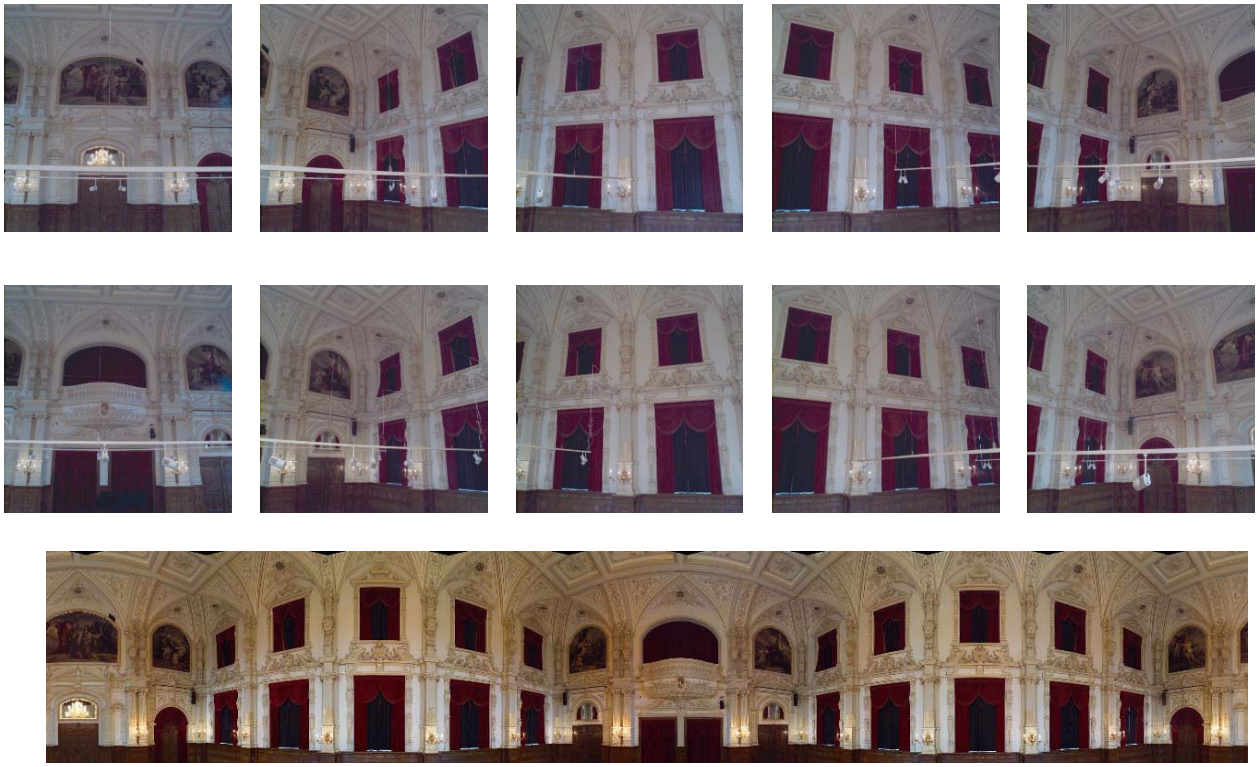


Abb. 5.35: Aufgenommene Einzelbilder und resultierendes Gesamtpanorama mit radiometrischer Bearbeitung (Oldenburger Schlosssaal)

Rotationszeilenabtaster

Rotationszeilenabtaster für die Panoramabilderfassung besitzen eine vertikal angeordnete Bildsensorzeile, die zusammen mit einem Objektiv um eine vertikale Stehachse herum gedreht werden und das Bild spaltenweise abtasten. Innerhalb der Sensorzeile besitzt die Kamera zentralperspektive Abbildungseigenschaften. In horizontaler Richtung entsteht das Bild durch Parallelprojektion auf einen Zylindermantel. In Abhängigkeit der Drehgeschwindigkeit und Abtastfrequenz besitzt das resultierende Bild üblicherweise nicht-quadratische Pixel.

Durch die mechanische Konstruktion und Abtastbewegung unterliegt dieses Aufnahmesystem gegenüber einer herkömmlichen Kamera zusätzlichen Fehlereinflüssen:

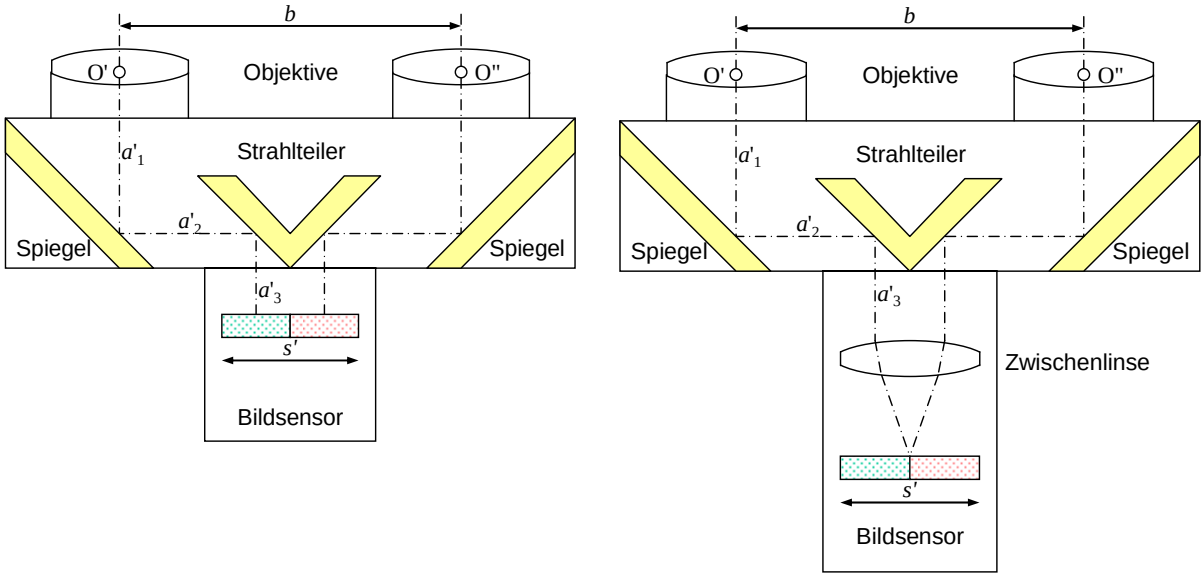
- Dejustierung der Sensorzeile: Neigung und Kantung gegenüber der Drehachse
- Drehbewegung: Taumelbewegung und Exzentrizität der Drehachse

Parian & Grün (2004) sowie Schneider (2008) haben mathematische Ansätze zu Beschreibung und Kompensation dieser Einflüsse entwickelt und in Bündelausgleichungsprogramme für Panoramaaufnahmen integriert. Im Rahmen von Mehrbildverbänden können die zusätzlichen Parameter signifikant bestimmt werden und ermöglichen die Auswertung mit einer mittleren Bildmessgenauigkeit von ca. 0.2 – 0.7 Pixel. Aufgrund der begrenzten mechanischen Stabilität der untersuchten Kameras können die erzielten Kalibrierergebnisse jedoch nicht als konstant für einen längeren Zeitraum angesehen werden. Für die photogrammetrische Auswertung ist daher eine zeitnahe Kamerakalibrierung unerlässlich.

5.5.2 Spiegelsysteme

5.5.2.1 Konstruktionen

Mit Hilfe von Strahlteilern und Umlenkspiegeln lassen sich mit nur einer Kamera Stereo- oder Mehrfachaufnahmen mit nur einer Belichtung erstellen. Diese Möglichkeit ist besonders dann von Interesse, wenn dynamische Szenen beobachtet werden und zwingend eine Synchronisation der beteiligten Kameras erforderlich ist. Einkamera-Strahlteilersysteme sind per se synchronisiert und eignen sich daher besonders für schnell ablaufende Vorgänge. Anwendungen sind bekannt aus dem Fahrzeugsicherheitsversuch (Stereo-Highspeed-Aufnahmen, Luhmann & Raguse 2005), der Strömungsmessung (4-Bild-Aufnahmen, Putze 2005), der Mikromontage (Berndt & Tutsch 2003) oder Sonderanwendungen wie der Mars Pathfinder (Stereovideokamera, Dorrer 1998). Erste Ansätze zur Beschreibung des photogrammetrischen Abbildungsmodells und der Kalibrierung finden sich bei Schöler (1981). Die folgenden Abhandlungen fassen aktuelle Entwicklungen und Untersuchungen zur Anwendung der Stereostrahlteilung mit Hochgeschwindigkeitskameras für die Anwendung im Fahrzeugsicherheitsversuch zusammen (Luhmann 2006, Raguse & Luhmann 2006).



a) ohne Zwischenoptik b) mit Zwischenoptik

Abb. 5.36: Prinzip einer Stereovorsatzkamera mit getrennten Objektiven

Das Stereostrahlteilprinzip kann prinzipiell auf zwei Arten realisiert werden. Es ist möglich, die Strahlaufteilung direkt vor dem Bildsensor vorzunehmen und die beiden getrennten Strahlenbündel über separate Objektive zu bündeln (Abb. 5.36a). Das Prinzip hat gegenüber einer Lösung mit einem gemeinsamen Objektiv jedoch gravierende Nachteile:

- es müssen zwei Objektive kalibriert werden;
- die resultierende Bildweite a' ergibt sich aus der Summe $a'_1 + a'_2 + a'_3$, d.h. die Bildweite ist wesentlich von der Basis abhängig,
  - daraus folgt z.B. mit f = 10 mm und a' = 250 mm eine fokussierte Aufnahmedistanz von nur a = 10.4 mm
  - sowie bei Blende 16 eine Schärfentiefe von nur 0.014 mm;
- das Strahlenbündel ist sehr schmal.

Für photogrammetrische Messaufgaben ergeben sich somit ohne zusätzliche Zwischenoptiken keine sinnvollen Anwendungsmöglichkeiten. Abb. 5.36b zeigt dazu eine prinzipielle Lösungsmöglichkeit mit einer zusätzlichen

Linse zwischen Strahlteiler und Sensor, die dem Prinzip eines Stereomikroskops (Regensburger 1990) angelehnt ist. Sie wird hier aufgrund der aufwendigeren photogrammetrischen Modellierung nicht weiter verfolgt.

Abb. 5.37 stellt das geometrische Abbildungsmodell eines Spiegelstereovorsatzes mit zentralem Objektiv dar. Gegenüber den oben gezeigten Varianten kann hier eine Kamera mit existierendem Objektiv oder auch verschiedenen Objektiven eingesetzt werden. Unter der Annahme ebener Spiegel- und Strahlteilerflächen ergeben sich danach zwei virtuelle Kameras mit den Projektionszentren O' und O", die nach wie vor der zentralperspektiven Abbildung genügen.

Die Basis b ist definiert zwischen den zwei Punkten O' und O". An diesen Punkten ist die photogrammetrische äußere Orientierung definiert, d.h. eine Änderung der Spiegelneigung oder –lage erzeugt eine veränderte Abbildungsgeometrie analog zur herkömmlichen Aufnahme mit getrennten Kameras. Der Bezugspunkt für die innere Orientierung der Kamera ist das im Objektiv liegende Projektionszentrum O. Der Öffnungswinkel τ für das halbe Bild ergibt sich aus dem halben horizontalen Sensorformat $s/2$ und der Kamerakonstante c. Für den Neigungswinkel der inneren Spiegel gilt $\beta_1 > \tau$, damit der äußere Strahl des Bildrandes noch vom Spiegel reflektiert wird. Der äußere Spiegel besitzt die Neigung β_2 und weist gegenüber dem inneren Spiegel einen Drehwinkel von α auf. In jedem Fall muss β_2 kleiner als β_1 sein, damit die beiden Hauptstrahlen h_1 und h_2 konvergent verlaufen und einen stereoskopisch überdeckten Raum ergeben. Gleichzeitig sollte β_2 gegenüber τ so eingestellt werden, dass die Randstrahlen r_1 und r_2 divergieren, um einen Objektraum zu erfassen, der breiter als die Basis b ist.

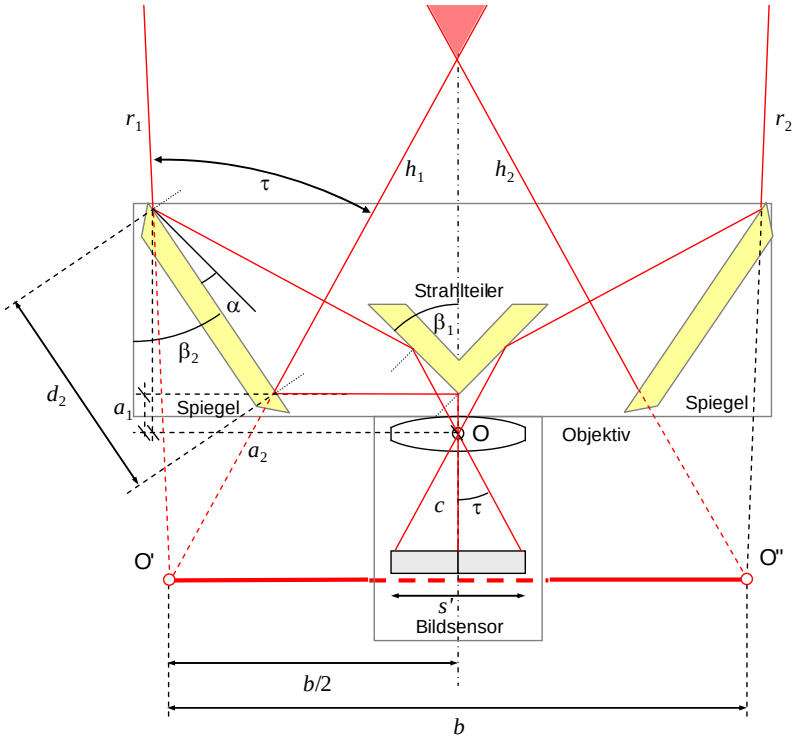


Abb. 5.37: Geometrisches Abbildungsmodell

Die notwendige Größe der äußeren Spiegel ist primär eine Funktion des Öffnungswinkels des Objektivs sowie abhängig von Abstand und Drehwinkel der Spiegel. Die Spiegelgröße wächst linear mit abnehmender Brennweite und zunehmendem Spiegelabstand. Das resultierende horizontale (stereoskopische) Messvolumen wird jeweils durch die inneren und äußeren Abbildungsstrahlen begrenzt und kann dabei eine Figur wie in Abb. 5.38 annehmen. Das vertikale Messvolumen ist wie sonst auch nur durch Öffnungswinkel und vertikales Bildformat definiert.

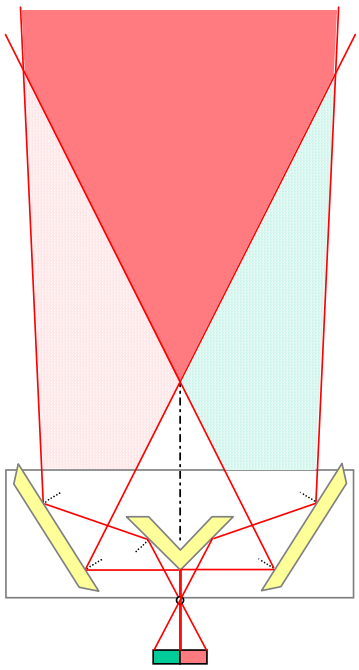


Abb. 5.38: Resultierendes stereoskopisches Messvolumen

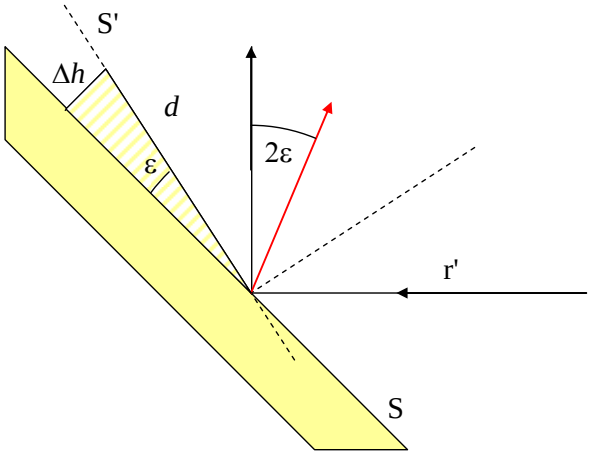


Abb. 5.39: Einfluss unebener Spiegelflächen

Die Ebenheit der Spiegelflächen muss den Anforderungen an die gewünschte Bildmessgenauigkeit genügen. Nach Abb. 5.39 führt ein gegenüber der idealisierten Spiegelebene S um ε geneigtes Flächenstück S' zu einer Winkelabweichung des Bildstrahls r' um 2ε. Die maximale zulässige Richtungsabweichung kann mit

$$2\varepsilon = \frac{\Delta x'}{c} \tag{5.47}$$

abgeschätzt werden, wobei $\Delta x'$ die erreichbare Bildmessgenauigkeit und c die Kamerakonstante darstellen. Für ein Beispiel mit $\Delta x' = 0.5$ µm (ca. 1/20 Pixel) und $c = 12.5$ mm ergibt sich die Winkelauflösung zu $2\varepsilon = 0.0023°$. Die maximale zulässige Unebenheit einer Spiegelfläche beträgt auf einer Länge d

$$\Delta h = \varepsilon \cdot d = \frac{\Delta x' \cdot d}{2c} \tag{5.48}$$

Für das obige Zahlenbeispiel dürfte ein Spiegel auf einer Länge von $d = 50$mm eine maximale Unebenheit von $\Delta h = 0.001$mm=1µm aufweisen, für kürzere Längen ergeben sich entsprechend noch kleinere Werte. An die Ebenheit werden also sehr hohe Anforderungen gestellt, sofern sie mathematisch nicht im Abbildungsmodell berücksichtigt werden kann.

Schöler beschreibt bereits 1981 ein analytisches Modell zur photogrammetrischen Auswertung von Stereovorsatzkameras. Der Ansatz basiert auf der optischen Konstruktion der Abbildungsgeometrie und definiert die beiden als Bezugspunkte wichtigen Projektionszentren durch die Lage der Eintrittspupillen, die sich als kreisförmige Öffnungen jeweils im Abstand der halben Basislänge von der optischen Achse des Objektivs bilden (Öffnungen I und II in Abb. 5.40).

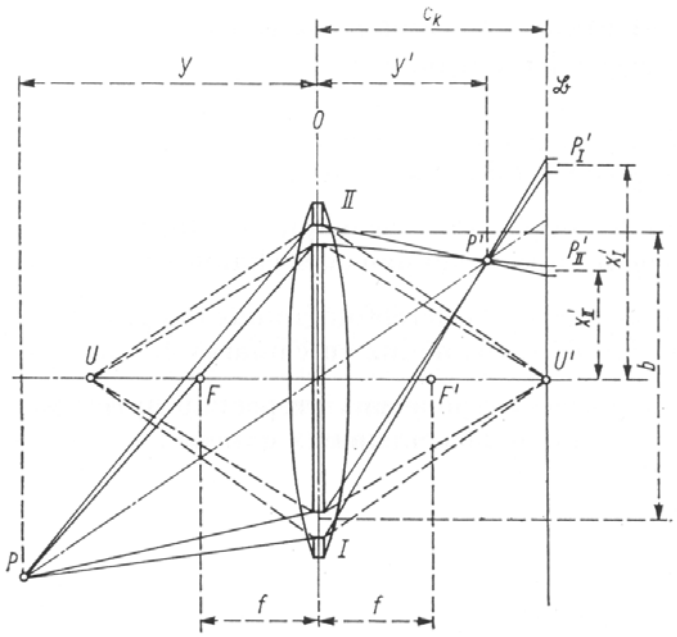


Abb. 5.40: Definition der Projektionszentren im Abbildungsmodell einer Stereovorsatzkamera (Schöler 1981).

Schöler (1981) leitet Gleichungen zur direkten photogrammetrischen Koordinatenberechnung in der Form $\underline{X} = f(x',y',...)$ ab. Das Modell enthält keine Bildfehler beschreibenden Funktionen und setzt daher die klassische Messkamera voraus, die üblicherweise praktisch verzeichnungsfrei ist und über eine ebene Bildfläche verfügt. Die gleichen Anforderungen werden an das Spiegelsystem gestellt, bei dem vollkommen ebene Spiegelflächen vorausgesetzt werden. Weiterhin ist der Ansatz nicht günstig für eine Formulierung als Beobachtungsgleichungen in einem Ausgleichungssystem und wird daher nicht weiter verfolgt.

Eine vollständige Modellierung der Abbildungsgeometrie ist prinzipiell möglich. Kotowski (1987) hat einen umfassenden photogrammetrischen Ansatz für lichtbrechende Trennflächen entwickelt (Multimedia-Photogrammetrie, siehe Kap. 5.1.3), der ebene und gekrümmte optische Trennflächen mit unterschiedlichen Brechzahlen in das analytische Abbildungsmodell integriert und auch innerhalb einer photogrammetrischen Bündelausgleichung realisiert werden kann. Nach dem Prinzip des Ray Tracings wird jeder Abbildungsstrahl vom Objektraum bis in den Bildraum verfolgt, wobei seine Brechungen an etwaigen Trennflächen oder Spiegeln durch Einfall- und Ausfallwinkel beschrieben werden, die jeweils aus dem Normalenvektor einer Trennfläche bzw. entsprechend dem Snellius'schen Brechungsgesetz abgeleitet werden. Die Anwendung auf Multimedia-Konfigurationen bei der Erfassung von Mehrbildsequenzen beschreibt Maas (1995).

Wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird, kann auf diesen komplexen mathematischen Ansatz jedoch verzichtet werden, wenn ein geeignetes Bündelausgleichungsprogramm mit integrierten Bedingungsgleichungen und Modellierung der Abbildungsfläche (Bildfläche) eingesetzt wird, das praktisch jede beliebige Stereoanordnung kalibrieren und orientieren kann.

5.5.2.2 Kameramodell

Zur Kalibrierung der inneren Orientierung der Stereokamera wird jedes Halbbild getrennt betrachtet. Liegen hinreichend ebene Spiegelflächen vor, kann ein herkömmlicher Parametersatz für die Kalibrierung herangezogen werden mit Funktionen für die radial-symmetrische Verzeichnung, tangentiale und asymmetrische Verzeichnung sowie Affinität und Scherung. Für jedes Halbbild liegt der Bildhauptpunkt jeweils am inneren Rand, je nach Justierung der optischen Komponenten auch außerhalb des Bildes.

Alternativ zu zwei unabhängig betrachteten Kameras kann auch ein Ansatz gewählt werden, beide Bildhälften mit einer gemeinsamen Korrekturfunktion für die radial-symmetrische Verzeichnung (da nur ein Objektiv existiert) und für Affinität und Scherung (da nur ein gemeinsamer Bildsensor existiert) zu beschreiben, die anderen Parameter jedoch getrennt zu bestimmen. Insbesondere werden die Parameter der tangentialen und asymmetrischen Verzeichnung durch Schiefstellung der Spiegelflächen beeinflusst und können größere Werte als die der radialen Verzeichnung annehmen (Beispiel in Abb. 5.43).

Unebene Spiegelflächen sind mit den oben beschriebenen Parametern nicht modellierbar. In diesem Fall hat sich der Ansatz bewährt, nicht-systematische Bilddeformationen mit Hilfe eines Korrekturgitters auf der Basis finiter Elemente zu beschreiben (Bündelausgleichungsprogramm FiBun, siehe Kap. 5.2.1). Diese Bilddeformationen können durch alle optischen Komponenten sowie durch mögliche Sensorunebenheiten hervorgerufen sein.

Je nach mechanischer Stabilität von Kamera, Objektiv und Spiegelvorsatz ist weiterhin eine bildvariante Modellierung des Projektionszentrums (Kamerakonstante und Bildhauptpunkt) erforderlich (Maas 1999a, Tecklenburg et al. 2001). Eine bildvariante Bestimmung des Projektionszentrums wird zum Beispiel durch die Bündelausgleichungsprogramme FiBun (IAPG) oder Ax.Ori (AXIOS 3D Services) ermöglicht.

Neben der inneren Orientierung werden die Parameter der relativen Orientierung beider Bilder benötigt. Wenn das Aufnahmesystem zwischen zwei Bildern keinen mechanischen Veränderungen unterliegt, kann in der Bündelausgleichung die zusätzliche Bedingung integriert werden, dass beide Kameras über die Bildsequenz eine feste relative Orientierung aufweisen.

5.5.2.3 Praktische Versuche

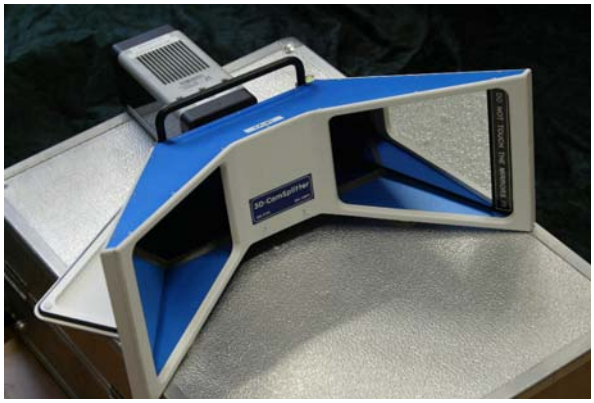
Abb. 5.41 zeigt zwei für die spätere Highspeed-Stereoaufnahme konzipierte Laboraufbauten mit unterschiedlichen Highspeedkameras, jeweils mit 12.5mm-Objektiv, 90°-Prisma und zwei Planspiegeln von 170 mm x 160 mm Seitenlänge. Im ersten Versuch wurde eine Weinberger Visario verwendet, die bei einem Bildformat von ca. 8.4 mm x 11.3 mm ein stereoskopisches Messvolumen von 700 mm x 700 mm x 300 mm bei einem Aufnahmeabstand von ca. 0.8 m erzeugt. Die wirksame Basislänge beträgt $b = 300$ mm. Im zweiten Versuch wurde eine Highspeedkamera NAC HiDcam II eingesetzt, die bei einem Bildformat von ca. 15.4 mm x 6.1 mm ein Messvolumen von 1200 mm x 1200 mm x 400 mm bei einem Aufnahmeabstand von ca. 2.0 m aufweist. Ein auf dieser Basis entwickelter erster Prototyp (Abb. 5.42) wird inzwischen als Serienprodukt angeboten.

Das Aufnahmesystem wird jeweils mittels Testfeldaufnahmen kalibriert, die den üblichen Kalibrieranordnungen für die Simultankalibrierung folgen (Luhmann 2003).

a) Weinberger Visario b) NAC HiDcam II

Abb. 5.41: Versuchsaufbauten mit Highspeed-Kamera und optischer Stereobildtrennung

a) Erster Prototyp (IAPG, 2005)



b) Serienprodukt (3D-CamSplitter, 2008)

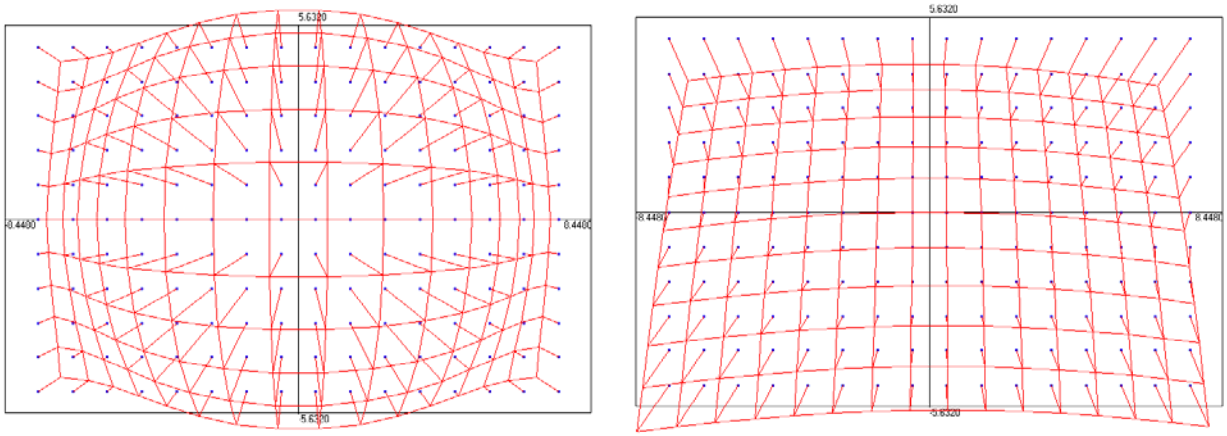
Abb. 5.42: Praktische Realisierungen des Stereovorsatzes

Nach der Bündelausgleichung wurden die Ergebnisse aus Tab. 5.6 ermittelt. In beiden Fällen wurden Bildmessgenauigkeiten im Submikrometerbereich erreicht. Die Objektpunktgenauigkeiten liegen entsprechend im Bereich bis maximal ca. 30 µm. Die etwas schlechteren Messergebnisse des ersten Versuches sind weniger auf die verwendete Kamera als vielmehr auf ungünstigere Versuchsbedingungen (Störlicht, Erschütterungen) zurückzuführen.

		Weinberger Visario	**NAC HiDcam II**
Sigma 0		0.9 µm (0.05 Pixel)	0.52 µm (0.04 Pixel)
Parameter der inneren Orientierung	c x'_0 y'_0 A_1 A_2 A_3 B_1 B_2 C_1 C_2	-12.6174 mm -0.0399 mm -0.2630 mm -5.00e-04 5.29e-06 -1.86e-08 -4.12e-05 -1.73e-04 -2.25e-05 1.62e-04	-12.5386 mm -0.2189 mm -0.2277 mm -5.72e-04 5.44e-06 -2.09e-08 1.606e-05 -9.07e-05 -3.36e-04 1.07e-04
RMS Objektkoordinaten	X Y Z	0.012 mm 0.024 mm 0.029 mm	0.018 mm 0.014 mm 0.023 mm
Basis	b	303 mm	190 mm

Tab. 5.6: Kameraparameter bei kombinierter Auswertung (Auswahl)

Die hier verwendeten Planspiegel zeigen nur eine geringe Unebenheit, die durch das Finite-Elemente-Gitter beschrieben wird. Leichte Abweichungen der Spiegelebenen aus der Vertikalebene führen jedoch zu erheblichen Werten der tangentialen Verzeichnung. Sie erreicht größere Beträge im Bild als die radial-symmetrische Verzeichnung (siehe Abb. 5.43).



a) Radial-symmetrische Verzeichnung b) Tangential-asymmetrische Verzeichnung

Abb. 5.43: Verzeichnungseffekte der Spiegelvorsatzkamera (50fach überhöht, Objektiv 12.5mm)

Die erfolgreiche Entwicklung und photogrammetrische Modellierung des Stereospiegelvorsatzes hat inzwischen zur kontinuierlichen Anwendung bei fast allen Automobilherstellern geführt. Der entwickelte Prototyp wird nun in Serie hergestellt und wurde dabei aus Kosten- und Gewichtsgründen in einigen Details verändert. So wird das bisher als Strahlteiler eingesetzte 90°-Prisma durch zwei in einem ähnlichen Winkel zusammengeklebte Spiegelflächen ersetzt. Die großen Umlenkspiegel sind mit 3mm wesentlich dünner als die im Prototyp (10 mm), aber auch erheblich leichter.

Die in der Praxis teilweise aufgetretenen Genauigkeitsprobleme mit dem Seriengerät wurden am IAPG analysiert. Dazu wurden umfangreiche herkömmliche Bündelausgleichungen mit Selbstkalibrierung gerechnet sowie Kalibrierungen mit dem Finite-Elemente-Modell. Abb. 5.44 zeigt die nach einer Finiten-Elemente-Kalibrierung berechneten Korrekturgitter für beide Bildhälften. Hier werden im Gegensatz zum Prototypen erheblich größere nichtsystematische Bilddeformationen sichtbar. Sie werden nach aktuellen Erkenntnissen durch die ungleichmäßige Verklebung der Spiegel am Gehäuse verursacht.

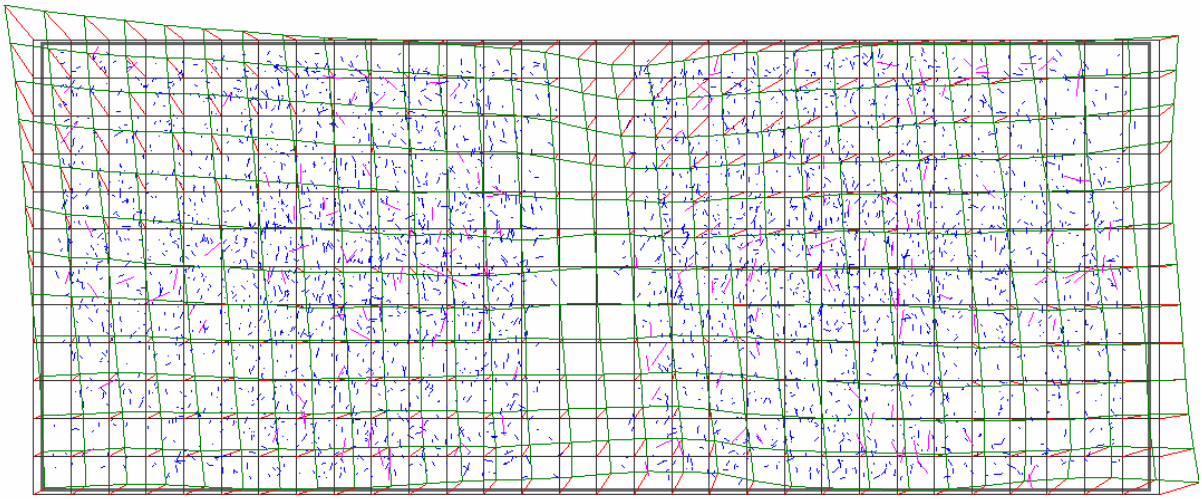


Abb. 5.44: Korrekturgitter des Serienmodells

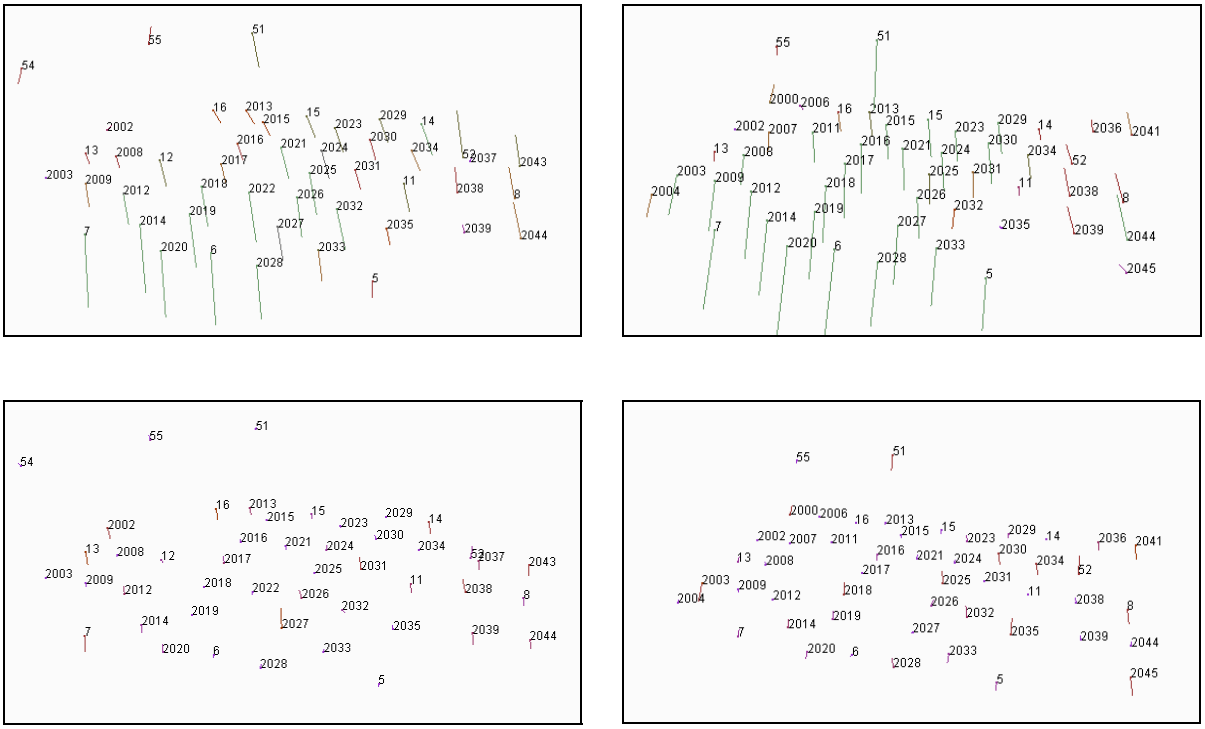


Abb. 5.45: Restfehler im Objektraum bei herkömmlicher Kalibrierung (links) und Finite-Elemente-Korrektur (rechts)

Abb. 5.45 zeigt die Abweichungen der durch räumlichen Vorwärtsschnitt berechneten Objektkoordinaten zu den übergeordnet genau bestimmten Sollkoordinaten. Mit einem herkömmlichen Ansatz zur Kameramodellierung ergeben sich Abweichungen im Objektraum von bis zu 5 mm. Werden die gemessenen Bildkoordinaten durch das Korrekturgitter verbessert, verschwinden die großen Abweichungen vollständig und sinken unter 2 mm.

6 Kalibrierung und Genauigkeit

In diesem Abschnitt wird der Zusammenhang zwischen photogrammetrischer Kamerakalibrierung und der im Objektraum erzielbaren äußeren Genauigkeit diskutiert. Dazu werden zwei systematische Untersuchungen zur Wirkungsweise verschiedener Kameramodelle und Kalibrierstrategien vorgenommen und bewertet. Ziel ist das Verständnis der einzelnen Vorgehensweisen im Hinblick auf eine optimierte Messgenauigkeit im Objektraum. Die Analyse der jeweils erzielten Ergebnisse erfolgt dabei sowohl durch statistische Kenngrößen, die aus der Bündelausgleichung berechnet werden (innere Genauigkeit), als auch mit unabhängigen Vergleichslängen zur Ableitung der erzielten Längenmessabweichung (äußere Genauigkeit).

Nach einer Definition der zur Verfügung stehenden Qualitätsmaße werden zwei Versuchsreihen erläutert. Die erste Versuchsserie befasst sich mit drei verschiedenen hoch auflösenden Digitalkameras mit Objektiven fester Brennweite. Ziel ist das Erreichen einer möglichst hohen Genauigkeit im Objektraum in einer Zielgrößenordnung von ca. 1:100 000 für die Messung von Längen, wie sie heute im Bereich der hochgenauen Industriephotogrammetrie erreicht werden kann. Die zweite Versuchsserie dient der Untersuchung einer Spiegelreflexkamera mit Vario-Objektiv, das konstruktiv bedingt größere mechanische Instabilitäten und eine geringere optische Abbildungsqualität erwarten lässt. In beiden Versuchsreihen werden die Korrekturmodelle variiert und die Wirkungsweise der gewählten Modelle diskutiert.

6.1 Qualitätskriterien

6.1.1 Innere Genauigkeit

Die aus internen statistischen Größen einer Ausgleichungsrechnung ableitbaren Qualitätsparameter spiegeln die Güte wider, mit der die eingegebenen Messdaten (Beobachtungen) unter Berücksichtigung der geometrischen Konfiguration (Design-Matrix) auf das verwendete funktionale Modell passen.

Die wesentlichen internen Genauigkeitsmaße können aus der Varianz-Kovarianz-Matrix und den Verbesserungen (Residuen) der Beobachtungen abgeleitet werden. Aus der für die Kamerakalibrierung üblicherweise eingesetzten Bündelausgleichung lassen sich allgemeine Projektkenndaten, bildbezogene Kenngrößen und objektbezogene Genauigkeitsmaße ableiten (Abb. 6.6). Zu den wichtigen Parametern zählen dabei (vergleiche auch Kap. 1.4.3):

- Anzahl und Verteilung der Objektpunkte
  Die Anzahl der am Objekt bestimmten Punkte muss so groß sein, dass bei hinreichender Anzahl von Bildern eine ausreichende Gesamtredundanz der Ausgleichung resultiert. Die räumliche Verteilung der Objektpunkte ist so zu gestalten, dass zum einen eine Verteilung der abgebildeten Bildpunkte über das gesamte Sensorformat möglich ist und zum anderen das Objekt selbst hinreichend durch die Objektpunkte repräsentiert wird.

- Anzahl Strahlen pro Punkt
  Die Angabe einer über alle Objektpunkte gemittelten Anzahl der Bildstrahlen erlaubt eine generelle Einordnung der Aufnahmekonfiguration. Für eine durchgreifende Kalibrierung sollten im Mittel nicht weniger als 8 Strahlen pro Punkt auftreten. Die Anzahl Strahlen für jeden individuellen Punkt kann Hinweise auf eine schwache geometrische Konfiguration geben, die jedoch nicht ohne Berücksichtigung der Redundanzanteile beurteilt werden sollte.

- Mittlerer Strahlenschnittwinkel
  Über alle gemessenen Punkte kann der mittlere Schnittwinkel der Bildstrahlen berechnet werden. Im Idealfall liegt dieser bei 90°, um eine in allen Koordinatenrichtungen gleichmäßige Messgenauigkeit zu gewährleisten.

- Anzahl Punkte pro Bild
  Die Anzahl der pro Bild gemessenen Punkte kann Hinweise auf einzelne Bilder des Bildverbandes geben, die mit zu wenigen Bildpunkten verknüpft sind und eine Schwachstelle im Aufnahmeverband darstellen können. Im Mittel sollten für Kalibrierungsaufnahmen in der Regel nicht weniger als 30% aller Objektpunkte in einem Bild abgebildet sein.

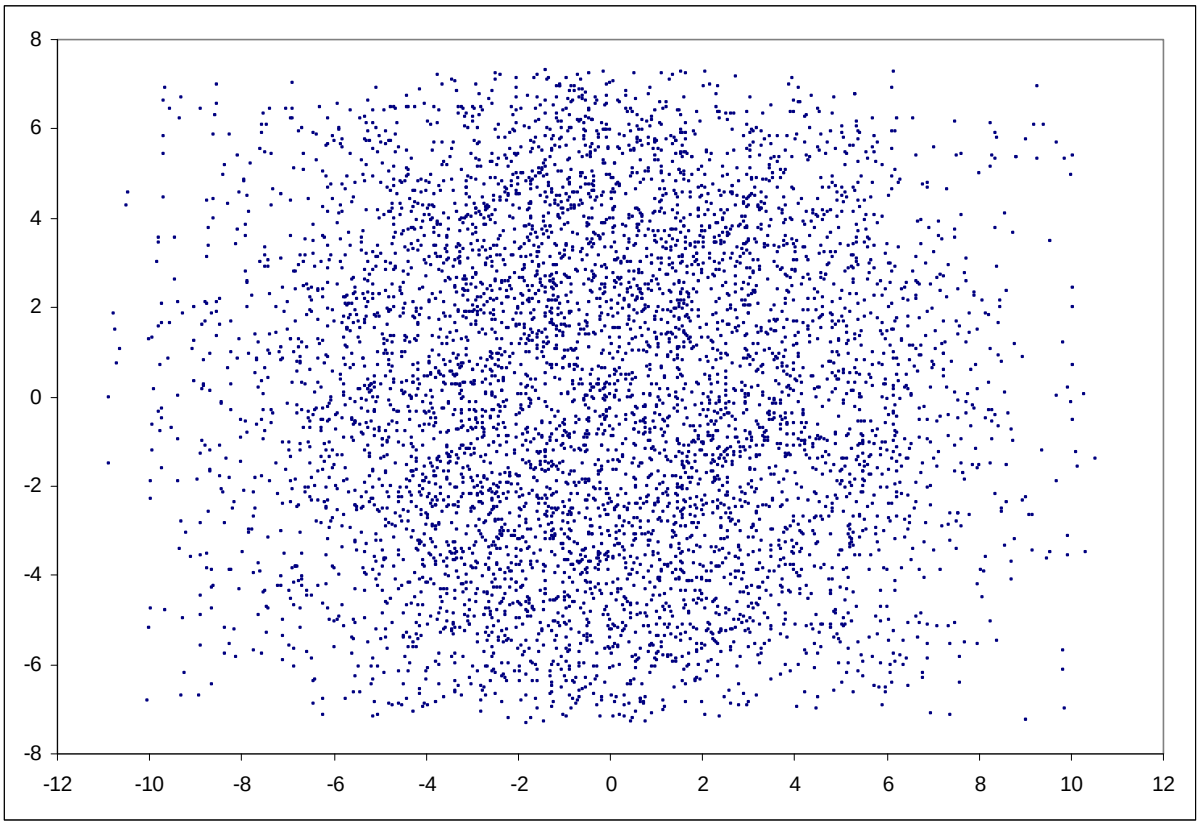
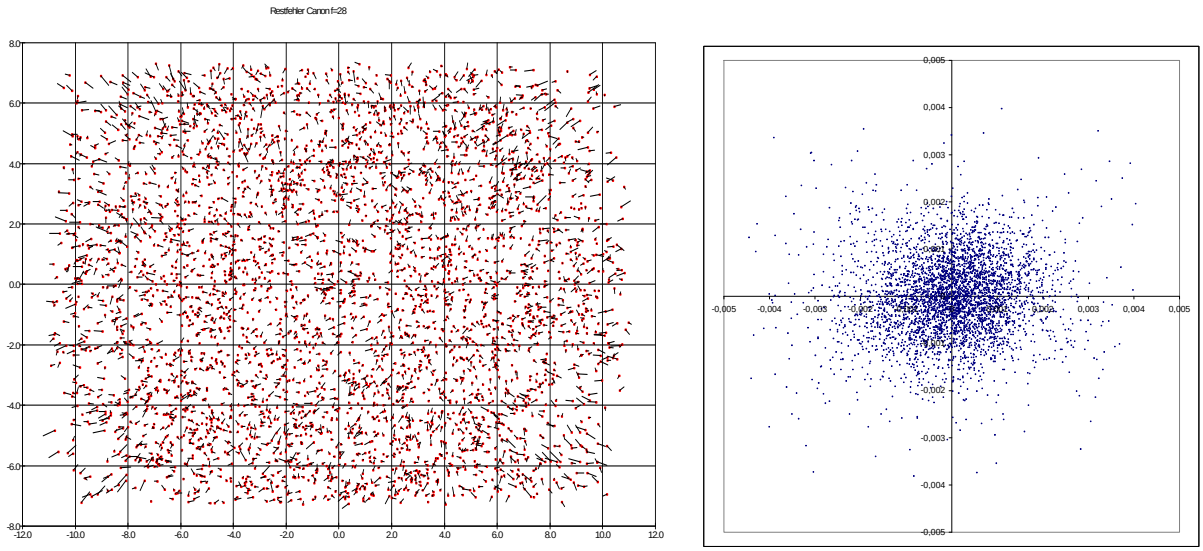


Abb. 6.1: Verteilung von Bildpunkte im Sensorformat (alle Bilder eines Verbandes)

- Verteilung der Bildpunkte
  Die Aufnahmeanordnung sollte so konfiguriert werden, dass über alle Bilder betrachtet eine möglichst vollflächige Abdeckung des Sensors erzielt wird, um insbesondere die Verzeichnungsfunktionen auch an den kritischen Bildrändern hinreichend gut zu erfassen. Bei der Aufnahme ist darauf zu achten, dass nicht immer dieselben Objektpunkte im gleichen Bildbereich erscheinen, wie es leicht bei zentrischer Anzielung des Objektes (optische Achse trifft immer im Zentrum des Objektes auf) geschieht. Das Beispiel in Abb. 6.1 zeigt eine zum Bildrand hin schwächere, also nicht optimale Bildpunktverteilung.

- Standardabweichung der Gewichtseinheit Sigma 0
  Wenn der Beobachtungssatz ausschließlich aus gleich gewichteten Bildkoordinaten besteht, spiegelt Sigma 0 die mittlere Bildmessgenauigkeit (einfache Standardabweichung mit Sicherheitswahrscheinlichkeit 68%) wider. Bei gemischten Beobachtungen (z.B. beobachtete Passpunkte, Strecken, geometrische Bedingungen) ist Sigma 0 nicht mehr geometrisch interpretierbar. Hier bietet sich eine Varianzkomponentenschätzung an (Kruck 1983, Schneider 2008).

- Mittlere Verbesserungen der Bildkoordinaten
  Die mittleren Verbesserungen der beobachteten Bildkoordinaten repräsentieren die mittlere Bildmessgenauigkeit der Aufnahmesequenz. Wenn kreisförmige Zielmarken und optimierte Bildmessalgorithmen (Schwerpunktoperator, Ellipsenoperator, Template Matching) verwendet werden, sind mittlere Bildmessgenauigkeiten von ca. 0.02 bis 0.06 Pixel erreichbar. Sind die Werte deutlich schlechter als diese Zielgrößen, liegt in der Regel ein Defizit im Kameramodell vor, z.B. verursacht durch qualitativ schlechte Objektive oder mechanisch instabile Kameras, sofern keine groben Fehler im Datensatz enthalten sind.

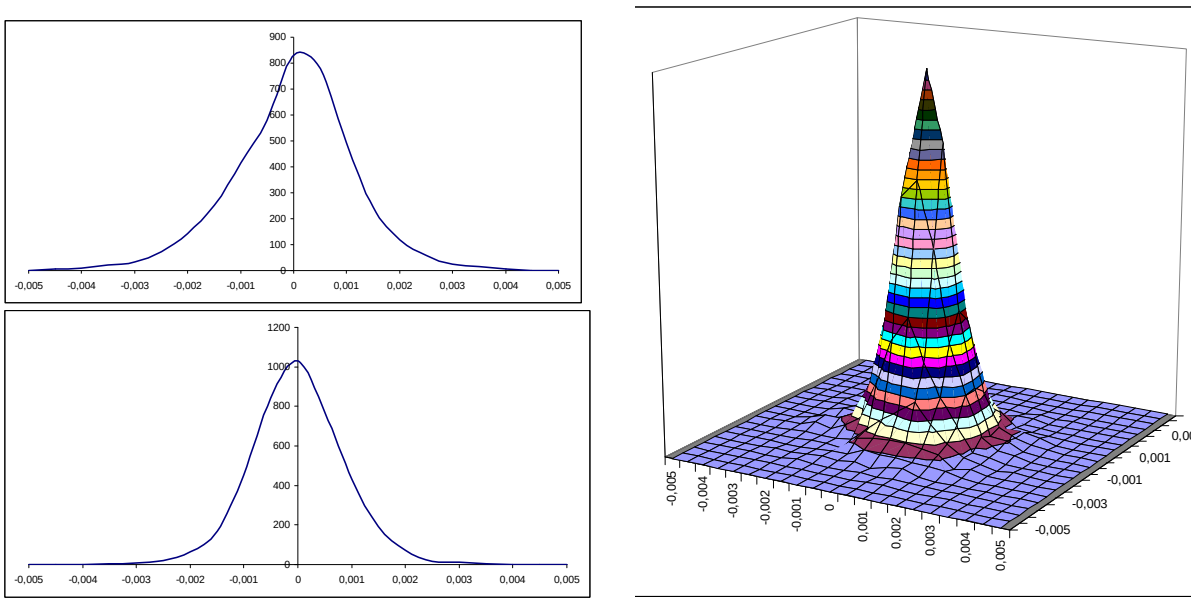


a) Verteilung der Restfehler im Sensorformat b) Streuung der Restfehler

Abb. 6.2: Diagramme der Bildresiduen (Canon EOS1000D mit Sigma 18-50, f=28mm)

- Verteilung der Residuen im Bild
  Die zu den gemessenen Bildpunkten berechneten Residuen können als Vektordiagramm flächenhaft im Bild dargestellt werden, um visuell zu kontrollieren, ob außergewöhnliche Restfehlerverteilungen oder systematische Effekte im Bildraum beobachtet werden können. Treten diese auf, so liegen üblicherweise verbleibende Ausreißer oder systematische Modellfehler vor. Abb. 6.2a zeigt die Verteilung im Bildformat und Abb. 6.2b die zugehörige Streuung der Residuen, deren Histogramme in x'- und y'-Richtung normalverteilt sind mit leichter systematische Verschiebung (Abb. 6.3).

  Die Restfehler können zusätzlich als Funktion des Bildradius dargestellt werden. Das Beispiel in Abb. 6.4 zeigt den mit zunehmendem Bildradius anwachsenden Mittelwert der Residuen, verursacht vor allem durch die zum Bildrand hin schlechter werdende Abbildungsqualität. Abweichungen der Kurve von der Horizontalen lassen aber auch den Schluss zu, dass die Verzeichnungsfunktion nicht optimal modelliert worden ist.



a) x'- und y'-Richtung b) Zweidimensionales Histogramm

Abb. 6.3: Histogramme der Bildresiduen (Canon EOS1000D mit Sigma 18-50, f=28mm)

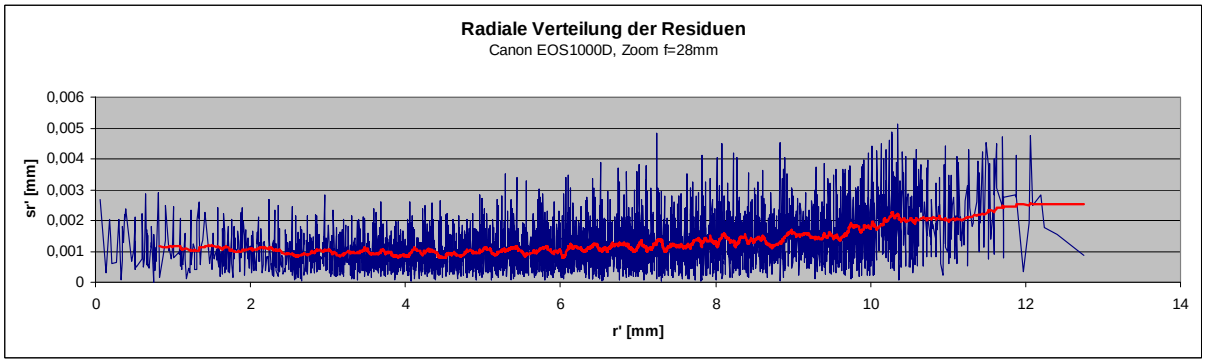


Abb. 6.4: Bildresiduen als Funktion des Bildradius mit Glättungslinie (Gleitender Mittelwert über 50 Werte)

- RMS-Wert der Objektkoordinaten

  Die mittlere quadratische Abweichung der Objektkoordinaten (RMS-Wert) ist ein Indiz für das erreichte Genauigkeitsniveau der Ausgleichung im Objektraum. Der Wert wird in der Regel mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 68% entsprechend 1 Sigma ausgegeben. Zusätzlich sollten hier zumindest die maximalen Standardabweichungen der Objektkoordinaten mit ausgegeben werden.

  Der Zusammenhang zwischen Standardabweichung der Bildkoordinaten $s_{x'y'}$, der Anzahl Bilder pro Standpunkt k, Bildmaßstabszahl m_b und Standardabweichung der Objektkoordinaten s_{XYZ} kann durch Einführung eines Design-Faktors q wie folgt formuliert werden (Fraser 1996):

$$s_{XYZ} = q \cdot m_b \frac{s_{x'y'}}{\sqrt{k}} \tag{6.1}$$

  In der Praxis ist k in der Regel 1. Der Design-Faktor q spiegelt die Aufnahmekonfiguration (z.B. Strahlenschnittbedingungen) und sonstige Einflüsse wider und nimmt für Rundum-Verbände Werte zwischen ca. 0.4 und 0.8 an. Für Stereo- oder andere eingeschränkte Aufnahmeanordnungen muss q nach Koordinatenrichtungen getrennt betrachtet werden, z.B. als Höhen-Basis-Verhältnis.

- Standardabweichungen der Kameraparameter
  Alle in der Ausgleichung berechneten Kameraparameter können mit ihren zugehörigen Standardabweichungen ausgegeben werden. Als Indiz für eine signifikante Berechnung sollte die Standardabweichung des Parameters mindestens eine Größenordnung kleiner als der Parameter selbst sein (Abb. 6.5). Generell kann aber nur ein statistischer Signifikanztest eine gesicherte Aussage zur Bestimmbarkeit eines Parameters geben.

- Korrelationen zwischen Kameraparametern
  Aus der Varianz-Kovarianz-Matrix sind Korrelationen zwischen den unbekannten Parametern ableitbar (Abb. 6.5). Bei Kamerakalibrierungen können häufig hohe Korrelationen zwischen den *A*-Parametern der radial-symmetrischen Verzeichnung sowie zwischen den Parametern B_1 und x'_0 bzw. B_2 und y'_0 beobachtet werden. Diese Korrelationen sind weitgehend unschädlich, wenn die im Rahmen der Bündelausgleichung berechneten Objektkoordinaten die Zielgröße der Auswertung sind (Remondino & Fraser 2006). Werden die Kameraparameter hingegen in einen separaten Auswerteprozess (z.B. in ein anderes Programm) übertragen, können sich hohe Korrelationen negativ auf die weiterverarbeiteten Ergebnisse auswirken. Kameraparameter mit Korrelationen nahe 1 können in der Regel problemlos eliminiert oder festgehalten werden, da sie keinen signifikanten Beitrag zur Modellierung der Abbildung leisten.

```
Kamera/R0:                1           8.325
 Ck       :        -46.3925      0.00230523
 Xh       :       -0.123668      0.00554459
 Yh       :       0.0252755      0.00365997
 A1       :    1.26724e-005    1.07611e-006
 A2       :    1.80647e-007    1.47871e-008
 A3       :   -3.20268e-010    6.15532e-011
 B1       :    3.12044e-006    1.17638e-006
 B2       :    2.29566e-006    7.80658e-007
 C1       :     0.000221813    8.99816e-006
 C2       :    1.72637e-005    9.10697e-006

Korrelation:

Ck     1.000
Xh    -0.039   1.000
Yh    -0.004  -0.002   1.000
A1    -0.105  -0.008  -0.011   1.000
A2     0.076   0.012   0.014  -0.972   1.000
A3    -0.062  -0.015  -0.014   0.919  -0.984   1.000
B1    -0.048   0.982  -0.003  -0.012   0.019  -0.023   1.000
B2    -0.013  -0.003   0.904  -0.006   0.006  -0.005  -0.005   1.000
C1     0.044   0.008  -0.017   0.030  -0.062   0.074   0.008  -0.007   1.000
C2     0.034   0.025  -0.000  -0.017   0.030  -0.041   0.024  -0.006   0.016   1.000
          Ck      Xh      Yh      A1      A2      A3      B1      B2      C1      C2
```

Abb. 6.5: Berechnete Kameraparameter, zugehörige Standardabweichungen und Korrelationen (AXIOS 3D Ax.Ori)

```
Gesamtstatistik
                 Standardabweichung:   0.000859
               Anzahl Beobachtungen:     3570
                  Anzahl Unbekannte:      613
                Anzahl Bedingungen:        6
                   Gesamtredundanz:     2963
             Durchlaufene Schleifen:        9
 Durchgeführte Ausreißererkennungen:        2
Statistik der Kameras
      Anzahl der festen Kameras:        0
 Anzahl der geschätzten Kameras:        1


Statistik der Bildkoordinaten für die Kameras:

   IOR  |    n     |  rms vx  |  rms vy  |  max vx  |  max vy  |
       1       1784   0.000807   0.000761  -0.002983   0.002972

Statistik der Objektpunkte
             Anzahl der festen Objektpunkte:        0
        Anzahl der geschätzten Objektpunkte:      121
        Durchschn. Strahlen pro Objektpunkt:       14.74

                                            |     x    |     y    |     z    |
               RMS der Standardabweichungen:   0.012227   0.012654   0.015697
                Maximale Standardabweichung:   0.032838   0.035836   0.034267

Statistik der Strecken
       Anzahl der verwendeten Strecken:        2
                RMS der Verbesserungen:     0.0115
                 Maximale Verbesserung:    -0.0133

Statistik der Bilder
          Anzahl der verwendeten Bilder:       40
 Mittlere Anzahl der Strahlen pro Bild:       44.6   pro Bild
           Minimale Anzahl von Strahlen:       24     in Bild  1
```

Abb. 6.6: Beispiel einer statistischen Zusammenfassung einer Bündelausgleichung (AXIOS 3D Ax.Ori)

Die oben genannten Parameter sind im Wesentlichen dazu geeignet, die Gesamtausgleichung hinsichtlich ihrer internen Konsistenz zu prüfen. Wenn keine äußeren oder übergeordneten Referenzmaße vorliegen, stellen die internen Qualitätsparameter die einzige Möglichkeit zur Beurteilung der Ausgleichungsgüte dar.

6.1.2 Äußere Genauigkeit

Die Ermittlung der äußeren Genauigkeit einer Bündelausgleichung kann nur durch Referenzmaße erfolgen, die selbst nicht am Ausgleichungsprozess beteiligt sind. Übliche Vorgehensweisen sind dabei:

- Überprüfung unabhängiger Referenzlängen
  Aus den berechneten Objektkoordinaten von Maßstabspunkten werden Distanzen berechnet und den kalibrierten Längen gegenübergestellt. Prüflängen sind in Nahbereichsanwendungen relativ leicht und kostengünstig bereitzustellen und repräsentieren die in technischen Anwendungen übliche Weiterverarbeitung der Koordinaten zu abgeleiteten Größen (Strecken, Deformationen, Flächen usw.). Weiterhin erlauben Prüflängen die Ermittlung der standardisierten Längenmessabweichung und die damit verbundene Rückführbarkeit auf die Einheit Meter. Voraussetzung ist, dass mindestens eine bekannte Länge (Systemmaßstab) im photogrammetrischen Netz vorhanden ist. Das Verfahren wurde im Rahmen der Richtlinie VDI/VDE 2634/1 inzwischen als industrieller Standard umgesetzt (Luhmann & Wendt 2000, VDI/VDE 2634) und wird heute auch als Test bei der Beurteilung von Kameras und Kalibrierungsergebnissen verwendet (z.B. Luhmann & Godding 2004, Rieke-Zapp et al. 2009). Die Darstellung der erreichten Längenmessabweichung erfolgt als einzelne Kenngröße E (Gl. 6.2) oder in Form eines Diagramms der Längenmessabweichungen (Abb. 4.12, weitere Beispiele in Kap. 6.2.2).

$$E = A + K \cdot L \leq B \tag{6.2}$$

mit
E: Grenzwert der dreidimensionalen Längenmessabweichung
A, *K*: gerätespezifische Konstanten
L: gemessene Länge
B: Maximalwert der Längenmessabweichung

Während mechanische Koordinatenmessgeräte häufig eine längenabhängige Längenmessabweichung aufweisen, kann dies bisher für photogrammetrische Bildverbände nicht grundsätzlich nachgewiesen werden. Die im Messvolumen verteilte Längenmessabweichung ist jedoch immer von der Bildanordnung abhängig und kann daher z.B. bei Stereosystemen zu schlechteren Werten in Z- als in XY-Richtung führen.

- Vergleich mit unabhängigen Prüfpunkten
  Wenn zu einigen der in der Bündelausgleichung berechneten Objektpunkte unabhängige Referenzkoordinaten mit übergeordneter Genauigkeit vorliegen, so kann ein direkter Vergleich der Koordinaten erfolgen. Dieses Verfahren ist sinnvoll nur dann anwendbar, wenn a) die Objektpunktbestimmung mit dem Ergebnis der Bündelausgleichung abgeschlossen ist und b) die Anforderungen an die Genauigkeit und Unabhängigkeit der Vergleichspunkte erfüllt sind. Beide Voraussetzungen sind in der industriellen Praxis nur selten gegeben, da zum einen Vergleichspunkte mit höherer Genauigkeit und Antastgüte häufig nicht zu beschaffen sind. Zum anderen sind Pass- und Vergleichspunkte miteinander korreliert, wenn sie mit der gleichen Messmethode erzeugt worden sind. Numerische Korrelationen zwischen Passpunkten und Neupunkten führen des Weiteren dazu, dass die Vergleichspunkte als unabhängige Prüfpunkte nur bedingt geeignet sind.

- Vergleich mit unabhängigen Vorwärtsschnitten
  Durchgreifender ist die unabhängige Messung weiterer Bildpunkte. Aus diesen nicht an der Bündelausgleichung beteiligten Bildmessungen und den aus der Bündelausgleichung ermittelten Parametern der inneren und äußeren Orientierung lassen sich über räumliche Vorwärtsschnitte Referenzpunkte oder Strecken bestimmen, die für eine unabhängige Ermittlung der äußeren Genauigkeit geeignet sind. Dieses Verfahren schließt alle Unsicherheiten der Bündelausgleichung ein und repräsentiert zudem die häufig anzutreffende Praxis, die berechneten Orientierungsdaten für weitere Objektmessungen zu nutzen.

6.1.3 Relative Genauigkeit

Die in Kap. 1.4 eingeführte relative Genauigkeit dient zur Darstellung der Leistungsfähigkeit eines Messsystems unabhängig von der Dimension des Messvolumens. Sie ist eine einheitslose Kennzahl in der Form 1:100 000, 10^{-6} oder 10ppm (Beispielzahlen). In der Nahbereichsphotogrammetrie ist es üblich, die erreichte Objektpunktgenauigkeit ins Verhältnis zur maximalen Objektausdehnung zu setzen.

Werden dabei interne Genauigkeitsmaße verwendet, z.B. RMS-Werte der Objektkoordinaten, stellt die daraus abgeleitete relative Genauigkeit auch nur ein inneres Genauigkeitsmaß dar und sollte als relative Präzision bezeichnet werden. Da sie zudem häufig auf einfachen Standardabweichungen basiert, sind damit dann nur 68% der Messungen repräsentiert. Durch Erhöhung der Beobachtungszahlen können praktisch beliebige, aber nicht zwingend praxisgerechte Genauigkeitsangaben erzeugt werden (Beispiele in Fraser et al. 2005, Parian et al. 2006).

Wird stattdessen die im Rahmen der Bündelausgleichung und anschließender Messungen gewonnene Längenmessabweichung auf die maximale Objektausdehnung bezogen, ergeben sich zwar geringere relative Genauigkeiten, die jedoch als praxisgerechter und seriöser zu betrachten sind.

6.2 Digitalkameras mit fester Brennweite

6.2.1 Prüfkörper

Im folgenden Versuch wird ein nach VDI/VDE 2634 Blatt 1 konfigurierter Prüfkörper mit 7 Referenzmaßstäben (Messlinien) und jeweils 10 kalibrierten Teillängen photogrammetrisch erfasst (Abb. 6.7b). Die Aufnahmekonfiguration entspricht den in jüngerer Zeit publizierten Vorschlägen und Untersuchungen zur VDI 2634, z.B. Jantos et al. 2002, Peipe & Tecklenburg 2009. Die Endpunkte der Prüfmaßstäbe bestehen aus retro-reflektierenden Zielmarken. Die Maßstäbe sind mit einer Messunsicherheit von 5µm kalibriert und zertifiziert worden.

Ziel der Untersuchung ist die systematische Erweiterung des Kameramodells um zusätzliche Parameter für einen typischen Rundum-Verband und die daraus jeweils folgende Längenmessabweichung. Die Aufnahmen erfolgen mit drei verschiedenen Digitalkameras (Abb. 6.7a, Tab. 6.1). Die Ergebnisse spiegeln damit den zurzeit aktuellen technischen Stand der Industriephotogrammetrie wider, sind jedoch nicht zwingend auf andere Aufnahmesysteme übertragbar.

a) Nikon D2X

b) Leica M8

c) Canon EOS 5D

d) Räumliches Testfeld nach VDI/VDE 2634 (IAPG)

Abb. 6.7: Kameras und Prüfkörper

Aufnahmesystem	**Nikon D3**	**Leica M8**	**Canon EOS5D**
Sensor			
Anzahl Pixel x	3552	3916	4368
Anzahl Pixel y	2832	2634	2912
Sensorformat x	30.00 mm	26.86 mm	35.82 mm
Sensorformat y	23.93 mm	18.07 mm	23.88 mm
Pixelgröße (quadratisch)	8.4 µm	6.8 µm	8.2 µm
Objektiv			
Brennweite	24 mm	28 mm	35 mm
Bilder			
Anzahl	141	126	130
Komprimierung	JPEG	JPEG	JPEG
Prüfkörper			
Signalisierung	Retro	Retro	Retro
Referenzstrecken (Teillängen)	7 (70)	7 (70)	7 (70)
Abmessungen (X)	1700 mm	1700 mm	1700 mm
Abmessungen (Y)	1700 mm	1700 mm	1700 mm
Abmessungen (Z)	1600 mm	1600 mm	1600 mm
Messelemente			
Anzahl Objektpunkte	301	292	330
Anzahl Systemmaßstäbe	1	1	1
Mittlerer Bildmaßstab	1:75	1:90	1:67

Tab. 6.1: Kenndaten des Versuchs

6.2.2 Untersuchungen

Die vorgenommenen Auswertungen erfolgen mit den Programmsystemen AICON 3D Studio (Bildmessung, Bündelausgleichung mit Standardverfahren), Ax.Ori (Bündelausgleichung mit bild-varianter innerer Orientierung) und FiBun (Finite-Elemente-Ausgleichung). Die eingeführten Beobachtungen wurden um grobe Fehler bereinigt. Die Erweiterung des funktionalen Modells der Kollinearitätsgleichungen erfolgt schrittweise nach folgendem Schema:

1. Alle Standardparameter: A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, C_1, C_2
2. Ohne Affinität und Scherung: A_1, A_2, A_3, B_1, B_2
3. Ohne tangentiale und asymmetrische Verzeichnung: A_1, A_2, A_3
4. Zwei radial-symmetrische Verzeichnungsparameter: A_1, A_2
5. Ein radial-symmetrischer Verzeichnungsparameter: A_1
6. Alle Standardparameter plus bildvariante Bestimmung von c, x'_0, y'_0
7. Finite-Elemente-Korrekturgitter: ohne B und C; A_1, A_2, A_3 bildinvariant; c, x'_0, y'_0 bildvariant

Die Ergebnisse der Untersuchungsreihen 1 bis 6 werden in Abb. 6.8 bis Abb. 6.12 zusammengefasst. Dargestellt sind jeweils die aus der Bündelausgleichung berechneten RMS-Werte der Objektkoordinaten als mittlerer Punktfehler, die zugehörigen Maximalwerte, die ermittelte Längenmessabweichung (LME) und die aus den RMS-Werten abgeschätzte theoretische Längenmessabweichung.

Die theoretische Standardabweichung s_L einer aus zwei Punkten berechneten Länge L ist gegeben durch

$$s_L^2 = \left(\frac{-\Delta x_{1,2}}{L}\right)^2 \cdot s_{x_1}^2 + \left(\frac{-\Delta y_{1,2}}{L}\right)^2 \cdot s_{y_1}^2 + \left(\frac{-\Delta z_{1,2}}{L}\right)^2 \cdot s_{z_1}^2 + \left(\frac{\Delta x_{1,2}}{L}\right)^2 \cdot s_{x_2}^2 + \left(\frac{\Delta y_{1,2}}{L}\right)^2 \cdot s_{y_2}^2 + \left(\frac{\Delta z_{1,2}}{L}\right)^2 \cdot s_{z_2}^2 \tag{6.3}$$

Weisen die Punkte jeweils die gleiche Standardabweichung (RMS-Wert) s_{XYZ} auf mit

$$s_{XYZ} = s_{x_1} = s_{y_1} = s_{z_1} = s_{x_2} = s_{y_2} = s_{z_2}$$

und werden mit dreifacher Standardabweichung angesetzt (Sicherheitswahrscheinlichkeit 99%), ergibt sich die theoretische Standardabweichung einer Länge zu

$$s_L = 3\sqrt{2} \cdot s_{XYZ} = \sqrt{18} \cdot s_{XYZ} \tag{6.4}$$

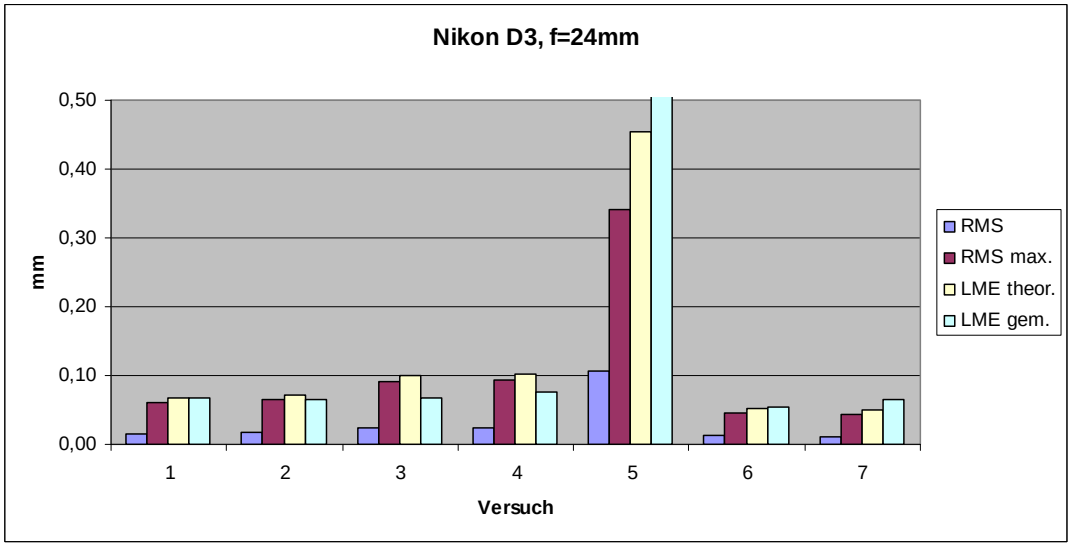


Abb. 6.8: Objektmessgenauigkeiten in den Versuchsreihen 1-7 (Nikon)

Die Zusammenstellung für die Nikon D3 (Abb. 6.8, Tab. 6.2) zeigt für den Versuch 1 (bildinvariant, alle Parameter) eine mittlere Bildmessgenauigkeit von 0.45 µm (1/20 Pixel) und einen RMS-Wert der Objektpunkte von 16 µm bei einer maximalen Längenmessabweichung LME von 65 µm. Diese Genauigkeit ist als sehr hoch zu bewerten und entspricht dem heute erreichbaren typischen Wert in der industriellen Praxis. Die theoretische Längenmessabweichung nach Gleichung (6.4) und der praktisch nachgewiesene LME stimmen überein. Ohne die Parameter C_1, C_2 für Affinität und Scherung und ohne B_1, B_2 für asymmetrische Verzeichnungsanteile steigt der RMS-Punktfehler geringfügig an, der LME bleibt jedoch unverändert. Der Bildsensor verfügt offenbar über hinreichend quadratische und orthogonal angeordnete Sensorelemente und das Objektiv zeigt eine hohe Zentrierungsgüte der Linsen. Eine weitere Reduktion der Kameraparameter führt zu einer deutlichen Verschlechterung der Ergebnisse, wobei Versuch 5 (nur A_1) erwartungsgemäß keine sinnvolle Kameramodellierung ergibt.

Sowohl Bildmessgenauigkeit, RMS-Wert als auch LME können nochmals verbessert werden, wenn der Ansatz der bildvarianten Bestimmung des Projektionszentrums verwendet wird (Versuch 6). Der RMS-Wert fällt auf 12 µm, der LME auf 55 µm. Besonders hervorzuheben ist, dass der maximale RMS-Wert mit 45 µm deutlich geringer ausfällt als in der vergleichbaren Versuchsreihe 1 mit 60 µm. Für diese Objektiv-Kamera-Kombination ist die bildvariante Auswertung also von großem Nutzen und bringt eine signifikante Genauigkeitssteigerung mit

sich (Abb. 6.9), wenn dabei alle Kameraparameter eingeführt werden. Die bildvariante Kalibrierung mit reduzierter Anzahl der Verzeichnungsparameter führt zu keinen brauchbaren Ergebnissen.

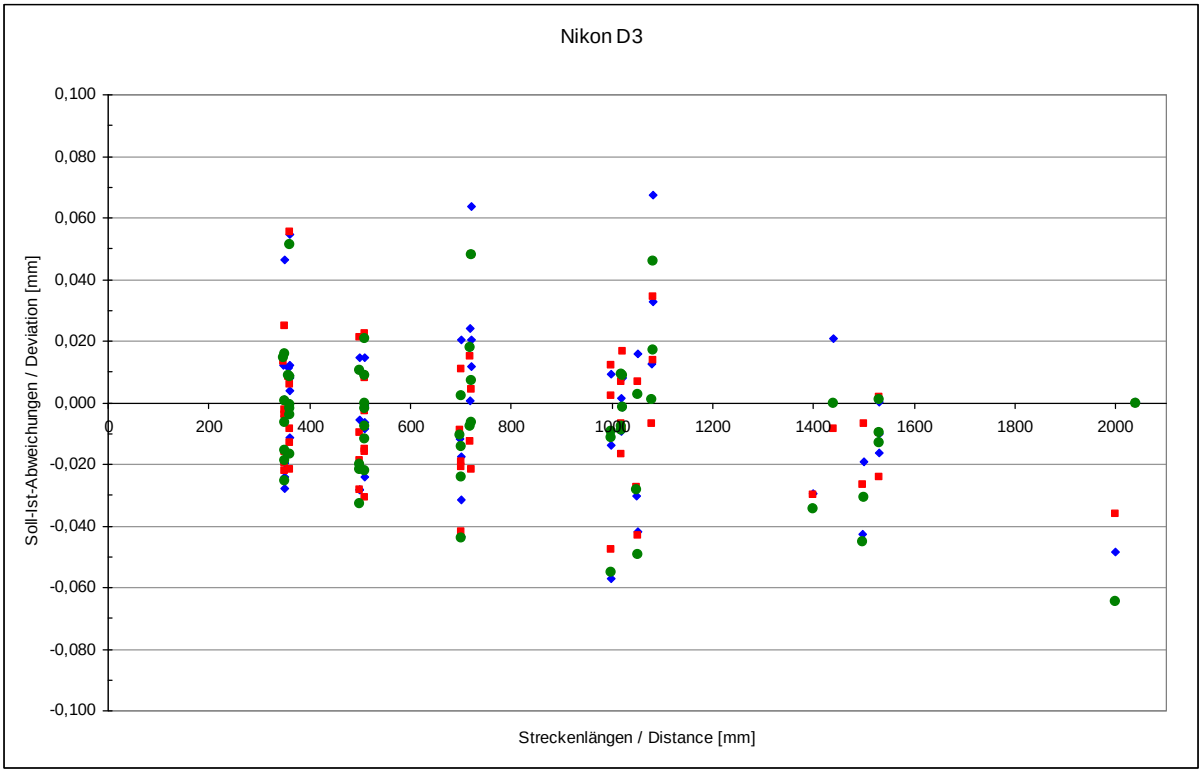


Abb. 6.9: Längenmessabweichungen für Nikon D3 bei bildinvarianter (blau), bildvarianter (rot) und Finite-Elemente-Kalibrierung (grün)

Die Kamerakalibrierung mit einem Korrekturgitter nach finiten Elementen (Versuch 7) erreicht bei den RMS-Werten das Niveau der bildvarianten Kalibrierung, beim LME jedoch nur das Ergebnis der bildinvarianten Kalibrierung nach Versuch 1. Die mit dem Korrekturgitter erreichte Steigerung der inneren Genauigkeit wirkt sich also nicht als Genauigkeitssteigerung einer Längenmessung aus.

Nikon D3	**Versuch 1**	**Versuch 6**	**Versuch 7**
Bildmessgenauigkeit	0.45 µm	0.33 µm	0.33 µm
Mittlerer quadratischer Fehler RMS-Punktfehler RMS maximal	 0.016 mm 0.061 mm	 0.012 mm 0.045 mm	 0.011 mm 0.043 mm
Längenmessabweichung LME gemessen LME theoretisch	 0.067 mm 0.068 mm	 0.055 mm 0.053 mm	 0.065 mm 0.049 mm
Relative Genauigkeit LME / L_{max} LME / D RMS / D	 1:30 000 1:44 000 1:184 000	 1:37 000 1:53 000 1:234 000	 1:32 000 1:45 000 1:253 000
Design-Faktor q	0.45	0.45	0.44

Tab. 6.2: Genauigkeitsmaße für Nikon D3

Tab. 6.2 fasst die RMS- und LME-Werte der Versuchsreihen 1 (bildinvariant, vollständiger Parametersatz), 6 (bildvariant, vollständiger Parametersatz) und 7 (Finite Elemente) zusammen. Je nach Definition der relativen

Genauigkeit können Werte angegeben werden, die sich bis zum Faktor 7 unterscheiden. Wird die relative Genauigkeit auf Basis des LME und der längsten geprüften Distanz L_{max} angegeben, wird der größte Wert (kleinster Nenner) erreicht. Da die photogrammetrische Längenmessgenauigkeit bei einem Rundumverband nicht längenabhängig angenommen werden kann, stellt die relative Genauigkeit bezogen auf die maximale Diagonale des Messvolumen D einen realistischeren Genauigkeitswert dar. Sie beträgt in diesem Fall bei bildvarianter Kalibrierung 1:53 000. RMS-bezogene Relativgenauigkeiten reichen hier bis zu 1:234 000 und spiegeln ausschließlich die innere statistische Präzision der Ausgleichung wider.

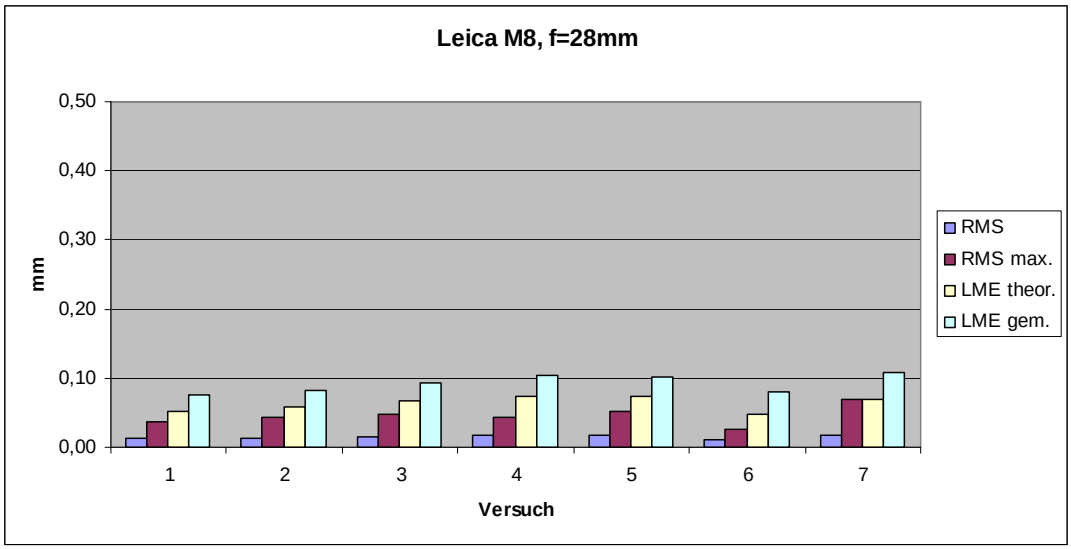


Abb. 6.10: Objektmessgenauigkeiten in den Versuchsreihen 1-7 (Leica)

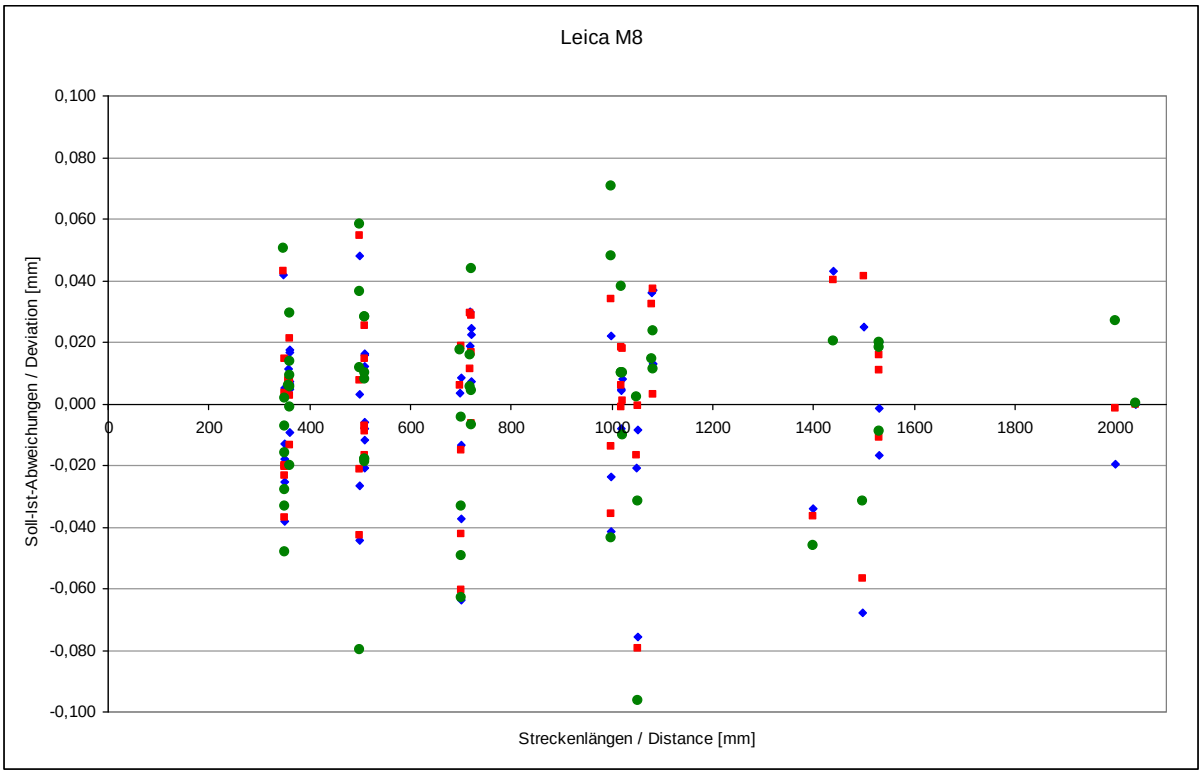


Abb. 6.11: Längenmessabweichungen für Leica M8 bei bildinvarianter (blau), bildvarianter (rot) und Finite-Elemente-Kalibrierung (grün)

Die Kalibrierung der Leica M8 zeigt ein im Wesentlichen konstantes Ergebnis, auch wenn die Anzahl der Kameraparameter heruntergesetzt wird (Abb. 6.10). Die RMS-Werte liegen im Minimum bei 14 µm und betragen maximal 18 µm bei einer mittleren Bildmessgenauigkeit von 0.4 µm (1/17 Pixel). Die LME-Werte variieren bei der bildinvarianten Modellierung zwischen 76 µm und 100 µm. Hier zeigt sich sehr deutlich, dass die kleinen RMS-Werte nur ein begrenzt gültiges Genauigkeitsmerkmal darstellen. Sie liegen in derselben Größenordnung wie bei der Nikon-Kamera, der LME erreicht dagegen fast den doppelten Wert. Die bildvariante Kalibrierung zeigt bei dieser Aufnahmeserie keinen nennenswerten Genauigkeitsgewinn (Abb. 6.11, Tab. 6.3). Die Einführung eines Korrekturgitters nach finiten Elementen verschlechtert das Ergebnis signifikant und lässt den Schluss zu, dass zusätzliche Gitterbedingungen zu einer Überparametrisierung führen. Insgesamt sprechen die Ergebnisse für die gute mechanische Stabilität der Kamera und das hochqualitative Leica-Objektiv, das ausschließlich mit A_1 schon hinreichend gut beschrieben werden kann.

Leica M8	**Versuch 1**	**Versuch 6**	**Versuch 7**
Bildmessgenauigkeit	0.39 µm	0.35 µm	0.35 µm
Mittlerer quadratischer Fehler RMS-Punktfehler RMS maximal	 0.012 mm 0.038 mm	 0.011 mm 0.027 mm	 0.016 mm 0.070 mm
Längenmessabweichung LME gemessen LME theoretisch	 0.076 mm 0.051 mm	 0.080 mm 0.048 mm	 0.107 mm 0.069 mm
Relative Genauigkeit LME / L_{max} LME / D RMS / D	 1:27 000 1:39 000 1:245 000	 1:26 000 1:37 000 1:259 000	 1:19 000 1:27 000 1:181 000
Design-Faktor q	0.45	0.44	0.51

Tab. 6.3: Genauigkeitsmaße für Leica M8

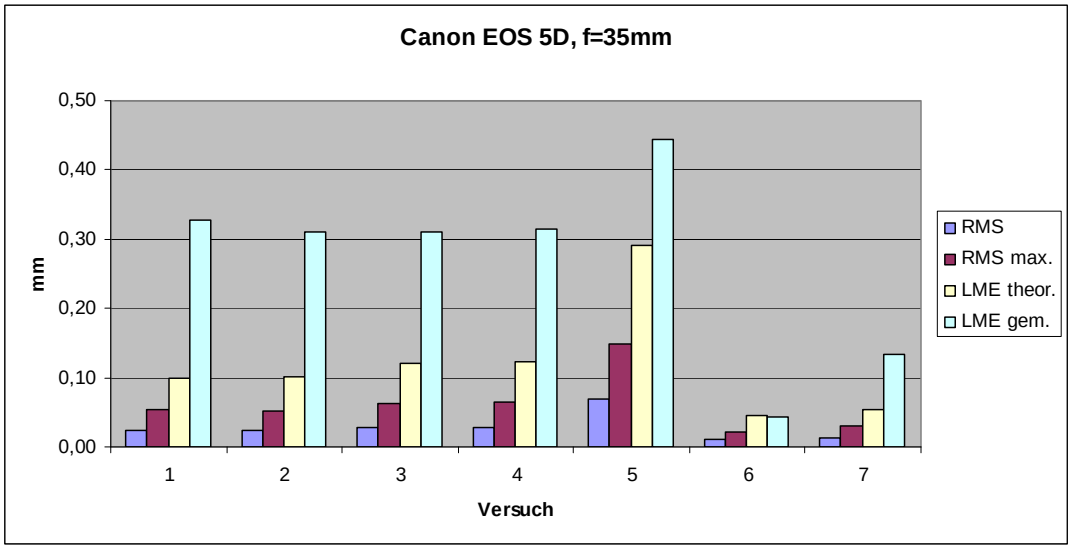


Abb. 6.12: Objektmessgenauigkeiten in den Versuchsreihen 1-7 (Canon)

Die Ergebnisse der Canon-Versuchsreihen zeigen in den Versuchsreihen 1-4 (bildinvariante Kalibrierung) zunächst eine hohe innere Genauigkeit mit RMS-Werten von 23 µm und einer Bildmessgenauigkeit von 0.8 µm. Gleichwohl liegt der LME mit über 0.3 mm in einer inakzeptablen Größenordnung. Abb. 6.13 zeigt dabei mit den eingeblendeten Grenzlinien einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Längenmessabweichung und gemessener

Länge. Hier kann als Ursache ein übergeordneter Maßstabsfehler angenommen werden, der sich jedoch in den aktuellen Versuchsdaten nicht nachweisen lässt. Veränderungen der Skalierung der Bildkoordinaten oder des eingeführten Systemsmaßstabes führen zu keiner nennenswerten Änderung des LME.

Führt man dagegen eine bildvariante Kalibrierung ein, fällt der RMS-Wert auf 11 µm und der LME auf 43 µm. Somit besitzt die Canon das gleiche Genauigkeitspotenzial wie die Nikon-Kamera, wenn die bildweisen Änderungen der inneren Orientierung berücksichtigt werden. Es bleibt jedoch bisher unklar, wie der Zusammenhang zwischen fester innerer Orientierung und Längenmessabweichung zu erklären ist. Möglicherweise berechnet die Bündelausgleichung für die instabile Kamera eine mittlere Kamerakonstante, die zwar eine hohe innere Genauigkeit (RMS-Werte) liefert, absolut gesehen jedoch den Maßstab des Gesamtsystems negativ beeinflusst.

Mit der Finite-Elemente-Modellierung wird eine ähnliche innere Genauigkeit wie bei der bildvarianten Kalibrierung erzielt. Der LME liegt jedoch bei 0.13 mm und beweist erneut, dass das Korrekturgitter keine positive Auswirkung auf die äußere Genauigkeit hat. Daraus kann auch gefolgert werden, dass die Einführung einer Gitterkorrektur für die hier betrachteten Bildsensoren bis maximal 36 mm x 24 mm keine Unebenheiten oder Deformationen nachweist, sondern offensichtlich Teile der Abbildungsfehler des Objektivs auffängt.

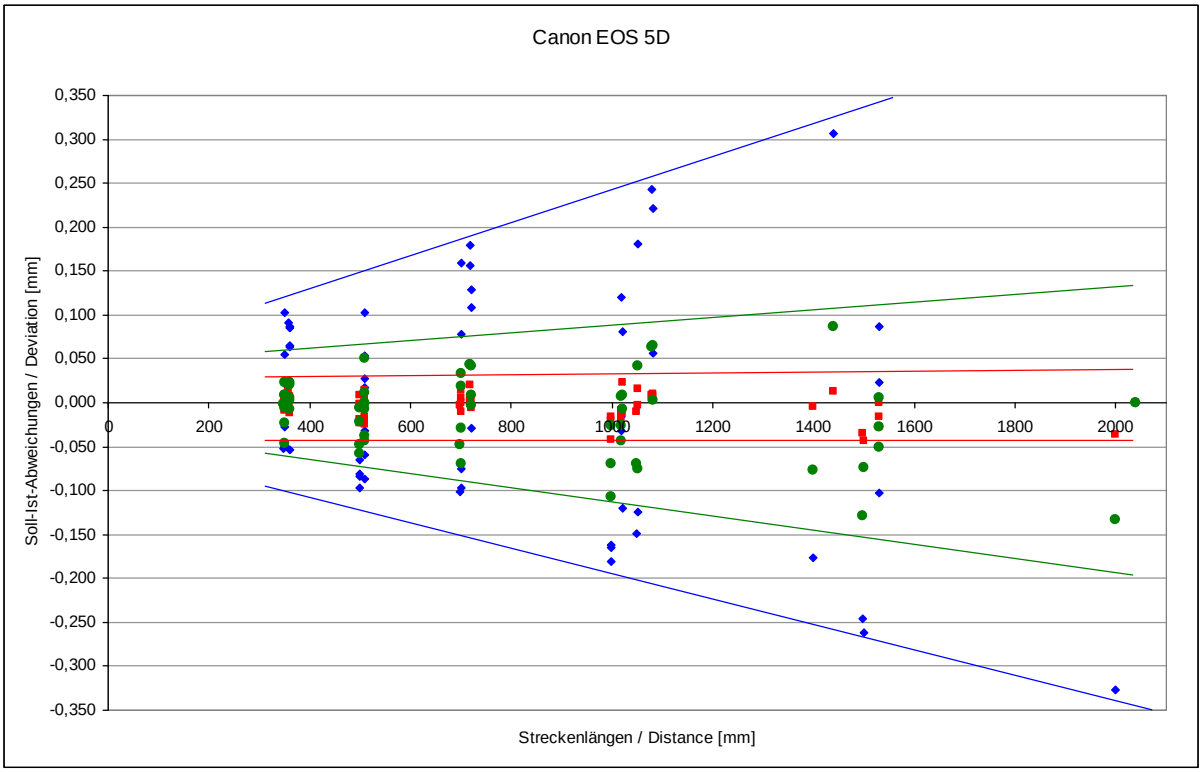


Abb. 6.13: Längenmessabweichungen Canon EOS 5D bei bildinvarianter (blau), bildvarianter (rot) und Finite-Elemente-Kalibrierung (grün)

Canon EOS 5D	**Versuch 1**	**Versuch 6**	**Versuch 7**
Bildmessgenauigkeit	0.80 µm	0.33 µm	0.40 µm
Mittlerer quadratischer Fehler RMS-Punktfehler RMS maximal	 0.023 mm 0.054 mm	 0.010 mm 0.023 mm	 0.013 mm 0.030 mm
Längenmessabweichung LME gemessen LME theoretisch	 0.33 mm 0.10 mm	 0.045 mm 0.044 mm	 0.133 mm 0.053 mm
Relative Genauigkeit LME / L_{max} LME / D RMS / D	 1:6 000 1:90 000 1:126 000	 1:47 000 1:68 000 1:280 000	 1:15 000 1:22 000 1:232 000
Design-Faktor q	0.37	0.36	0.48

Tab. 6.4: Genauigkeitsmaße für Canon EOS 5D

6.2.3 Bewertung

Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Versuchsreihen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die aufgenommenen Rundum-Bildverbände stellen eine hochredundante Aufnahmeanordnung mit durchschnittlich 120 Bildern dar. Der Design-Faktor liegt bei allen Aufnahmeserien bei ca. 0.45 und damit im Bereich hochgenauer Bildverbände.

- Die ermittelten RMS-Werte lassen keine zuverlässige Aussage über die mit dem Bildverband erreichte Genauigkeit im Objekt zu. Sie werden in der Regel zu optimistisch geschätzt. Eine ungenügende Modellierung der Kamerageometrie ist nicht zwangsläufig in den RMS-Werten und den daraus abgeschätzten theoretischen Längenmessabweichungen zu erkennen.

- Die Längenmessabweichung ist ein durchgreifendes und repräsentatives Genauigkeitsmaß, wenn die Maßstäbe das gesamte Messvolumen repräsentieren. Die Längenmessabweichung sinkt sofort, wenn Schwachstellen in der Kameramodellierung vorhanden sind. Für die untersuchten Bildverbände lässt sich die zu erwartende Längenmessabweichung aus den Standardabweichungen der Objekte abschätzen, wenn keine Modellfehler oder Ausreißer existieren.

- Ein Zusammenhang zwischen gemessener Länge und Längenmessabweichung ist nur in einem Versuch erkennbar und vermutlich auf die mechanische Instabilität der Kamera zurückzuführen. Bei bildvarianter Kalibrierung kann eine Längenabhängigkeit in keinem Fall nachgewiesen werden.

- Die bildvariante Kalibrierung bringt bei solchen Kameras einen signifikanten Genauigkeitsgewinn, die aufgrund des eingesetzten Objektivs größeren Einflüssen der Schwerkraft oder anderen mechanischen Effekten unterliegen.

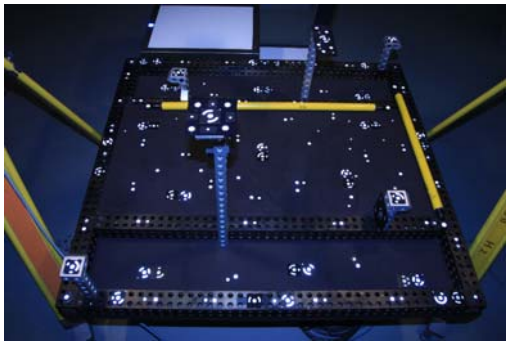
- Die Einführung des Finite-Elemente-Gitters wirkt sich positiv auf die innere Genauigkeit aus, neigt aber zur Überparametrisierung und verschlechtert i.d.R. die Längenmessabweichung gegenüber dem Ansatz der herkömmlichen bildvarianten Modellierung.

6.3 Digitalkamera mit Vario-Objektiv

6.3.1 Prüfkörper

Im folgenden Versuch wird ein am IAPG vorhandener Prüfkörper mit zwei Referenzmaßstäben photogrammetrisch erfasst. Der Prüfkörper ist in der Grundfläche 1 m x 1 m groß und besitzt einige sog. Hochpunkte, die bis zu 0.5 m aus der Grundebene herausragen (Abb. 6.14b). Unabhängige Prüfmaßstäbe stehen in dieser Untersuchung nicht zur Verfügung, daher werden die erreichten Objektgenauigkeiten anhand von RMS-Werten interpretiert.

a) Digitalkamera Canon EOS1000D mit Sigma DC 18-50mm



b) Ebenes Testfeld mit Hochpunkten (IAPG)

Abb. 6.14: Kamera und Prüfkörper

Ziel der Untersuchung ist die Kalibrierung einer Digitalspiegelreflexkamera mit Vario-Objektiv, das in verschiedene Brennweiteneinstellungen gebracht wird (Abb. 6.14a, Tab. 6.5). Das Objektiv wird während der jeweiligen Aufnahmesequenzen nicht weiter mechanisch fixiert. Die durchgeführten Untersuchungen sollen Aufschluss geben über die Stabilität und Genauigkeit der Kamera, aber auch die Wirkungsweise unterschiedlicher Verzeichnungsansätze im Hinblick auf die Zoomfunktion des Objektivs.

Aufnahmesystem	**Canon EOS1000D**
Sensor	
Anzahl Pixel x	3888
Anzahl Pixel y	2592
Sensorgröße x	22.2 mm
Sensorgröße y	14.8 mm
Pixelgröße	0.0057 mm
Objektiv	Sigma DC 18-50 mm
Brennweite	18, 28, 38, 50 mm
Lichtstärke	2.8
Bild	
Komprimierung	JPEG
Prüfkörper	
Signalisierung	retroreflektierend
Abmessungen (X)	1000 mm
Abmessungen (Y)	1000 mm
Abmessungen (Z)	500 mm
Messelemente	
Anzahl Objektpunkte	ca. 200
Anzahl Systemmaßstäbe	2
Anzahl Prüfmaßstäbe	0

Tab. 6.5: Kenndaten des Versuchs

6.3.2 Untersuchungen

Es wurden vier Bildverbände erzeugt, die aufgrund der beengten räumlichen Verhältnisse mit unterschiedlichen mittleren Bildmaßstäben aufgenommen werden mussten. Als Folge sinkt die Anzahl der beobachteten Objektpunkte mit zunehmender Brennweite. Für alle Bildverbände sind jedoch ausreichend viele Beobachtungen und eine für eine Kalibrierung hinreichende Aufnahmekonfiguration gegeben.

Die mit einem herkömmlichen Parametersatz erzielten Ergebnisse sind bereits in Kap. 5.4.1 kurz zusammengefasst worden. Die erzielten Messgenauigkeiten im Objektraum sind im Vergleich zum Versuch in Kap. 6.2 deutlich schlechter. Die Ursachen werden in mangelnder Objektiv- und Kamerastabilität vermutet. Ausgehend vom Standardparametersatz sollen daher Untersuchungen vorgenommen werden, die erreichte Messgenauigkeit mit alternativen Ansätzen zu steigern.

6.3.2.1 Bildinvariante Kalibrierung

Die Auswertung der aufgenommenen Bildverbände erfolgt zunächst mit dem kompletten Satz der Kameraparameter entsprechend der Versuchsreihe 1 aus Kap. 6.2.2. Die Ergebnisse werden in Tab. 6.6 zusammengefasst. Für alle Brennweiteneinstellungen fällt auf, dass die mittlere Bildmessgenauigkeit mit ca. 1 µm (entsprechend ca. 0.17 Pixel) äußerst schlecht ausfällt. Die RMS-Werte liegen zwischen 12 µm und 20 µm in XY-Richtung und zwischen 16 µm und 26 µm in Z-Richtung. Damit wird eine relative Präzision von ca. 1:80 000 erreicht, was im Vergleich zu Objektiven mit fester Brennweite um mindestens Faktor 2 schlechter ist. Die Ursachen werden in der instabilen Objektivkonstruktion mit beweglichen Linsenelementen vermutet. Weiterhin werden Einflüsse der mechanischen Verbindung zwischen Objektiv und Sensorposition sowie geometrische Veränderungen des Kunststoffgehäuses während der Bildaufnahmen angenommen. Schließlich ist das verwendete Objektiv aufgrund seiner Bauweise einem Messobjektiv unterlegen und dürfte insbesondere am Bildrand eine schlechtere Abbildungsqualität aufweisen.

Canon EOS 1000D / Sigma 18-50	**f=18mm**	**f=28mm**	**f=38mm**	**f=50mm**
Anzahl Bilder	36	36	36	34
Anzahl Beobachtungen	11616	8196	4958	3750
Anzahl Unbekannte	829	772	652	613
Mittl. Anzahl Strahlen pro Punkt	30.1	23.5	17.5	14.7
Sigma 0	0.00096	0.0010	0.0014	0.0008
Mittlere Bildmessgenauigkeit	0.00092	0.0010	0.0013	0.0008
Mittlerer quadratischer Fehler				
RMS X	0.016	0.015	0.020	0.012
RMS Y	0.018	0.015	0.020	0.013
RMS Z	0.023	0.021	0.026	0.016
Mittlerer Bildmaßstab	1:57	1:57	1:57	1:57
Relative Präzision	1:79 000	1:88 000	1:68 000	1:110 000
Design-Faktor	0.37	0.30	0.30	0.30

Tab. 6.6: Erreichte Genauigkeiten für Canon EOS 1000D mit Vario-Objektiv bei bildinvarianter innerer Orientierung

```
Kamera/R0:                1           8.325
 Ck       :        -17.9627     0.000516927
 Xh       :       -0.165898     0.000752217
 Yh       :     -0.00561799     0.000666957
 A1       :     -0.00043877    8.47867e-007
 A2       :      1.214e-006    1.36569e-008
 A3       :   -8.20251e-010    6.50718e-011
 B1       :    5.57261e-006    6.06941e-007
 B2       :   -2.89399e-006    5.41127e-007
 C1       :   -1.84138e-005    5.41017e-006
 C2       :    4.65519e-005    5.34062e-006

Korrelation:

Ck     1.000
Xh    -0.022   1.000
Yh    -0.064  -0.005   1.000
A1    -0.028   0.026   0.009   1.000
A2    -0.110  -0.022  -0.005  -0.954   1.000
A3     0.134   0.021   0.006   0.890  -0.981   1.000
B1    -0.003   0.911  -0.000   0.013  -0.007   0.006   1.000
B2    -0.022  -0.008   0.855  -0.004   0.003  -0.002  -0.004   1.000
C1     0.166   0.008   0.007   0.030  -0.081   0.088   0.008   0.010   1.000
C2    -0.012  -0.006   0.006  -0.022   0.024  -0.021   0.000   0.013  -0.009   1.000
         Ck      Xh      Yh      A1      A2      A3      B1      B2      C1      C2
```

Abb. 6.15: Berechnete Kameraparameter für Canon EOS 1000D mit Vario-Objektiv 18mm bei bildinvarianter innerer Orientierung

Die in Abb. 6.15 zusammengefassten Kameraparameter für die 18mm-Zoomeinstellung zeigen bei Kamerakonstante und Bildhauptpunkt eine höhere Genauigkeit als aus der mittleren Bildmessgenauigkeit zunächst vermuten lässt. Da im Allgemeinen beide Werte ähnliche Größen aufweisen, ist hier Potenzial für eine verbesserte Kameramodellierung sichtbar. Die Verzeichnungsparameter werden signifikant bestimmt und weisen keine Auffälligkeiten auf.

6.3.2.2 Bildvariante Kalibrierung

Mit dem in Kap. 5.3.1 beschriebenen Ansatz zur bildvarianten Kalibrierung wird dem Umstand Rechnung getragen, dass von Bild zu Bild geometrische Änderungen des Projektionszentrums im Bildraum auftreten können. In der nachfolgenden Untersuchung werden jeweils bildvariante Kamerakonstante und Projektionszentrum eingeführt bei festgehaltenen (bildinvarianten) Verzeichnungsparametern. Im Vergleich zur bildinvarianten Kalibrierung wird eine signifikante Genauigkeitssteigerung im Bild- und Objektraum um fast den Faktor 1.8 erreicht (Tab. 6.7). In allen Zoomeinstellungen werden praktisch gleiche Genauigkeiten erreicht, wobei auch in Z-Richtung fast das gleiche Niveau wie in XY-Richtung erreicht wird. Die relative Präzision steigt auf ca. 1:120 000.

Canon EOS 1000D / Sigma 18-50	**f=18mm**	**f=28mm**	**f=38mm**	**f=50mm**
Anzahl Bilder	36	36	36	34
Anzahl Beobachtungen	11620	8206	4952	3568
Anzahl Unbekannte	946	889	754	730
Mittl. Anzahl Strahlen pro Punkt	30.1	23.6	17.5	14.7
Sigma 0	0.00051	0.00062	0.00063	0.00066
Mittlere Bildmessgenauigkeit	0.0005	0.0006	0.0005	0.0006
Mittlerer quadratischer Fehler				
RMS X	0.010	0.012	0.013	0.012
RMS Y	0.011	0.011	0.012	0.012
RMS Z	0.014	0.016	0.016	0.014
Mittlerer Bildmaßstab	1:57	1:57	1:57	1:57
Relative Präzision	1:128 000	1:115 000	1:110 000	1:118 000
Design-Faktor	0.40	0.38	0.48	0.38

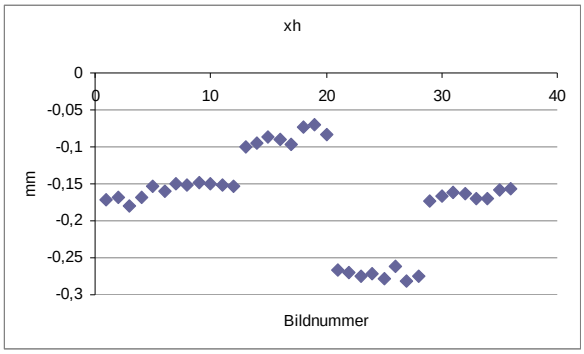
Tab. 6.7: Erreichte Genauigkeiten für Canon EOS 1000D mit Vario-Objektiv bei bildvarianter innerer Orientierung

```
Kamera/R0:                1                0
 Ck       :        -18.4091             fest
 Xh       :       -0.165894             fest
 Yh       :     -0.00574061             fest
 A1       :    -0.000411049    4.52213e-007
 A2       :    1.08642e-006    6.92917e-009
 A3       :   -6.95777e-010    3.19253e-011
 B1       :    5.32253e-006    3.15754e-007
 B2       :   -4.39529e-006    2.86122e-007
 C1       :     0.000108614    3.86271e-006
 C2       :    -2.4835e-005    3.06972e-006

Korrelation:

A1     1.000
A2    -0.924   1.000
A3     0.858  -0.979   1.000
B1     0.013  -0.007   0.005   1.000
B2    -0.020   0.004  -0.003  -0.011   1.000
C1     0.115  -0.077   0.065  -0.021  -0.007   1.000
C2    -0.031   0.028  -0.019  -0.009   0.014  -0.037   1.000
         A1      A2      A3      B1      B2      C1      C2
```

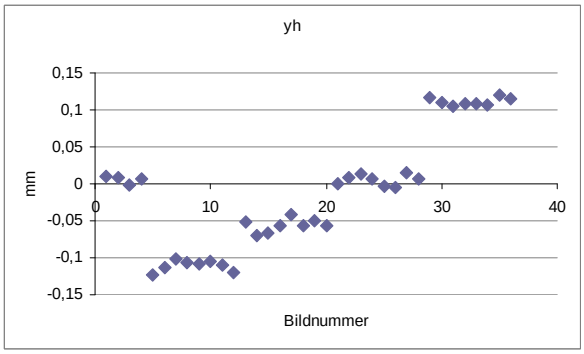
Abb. 6.16: Berechnete Kameraparameter für Canon EOS 1000D mit Vario-Objektiv 18mm bei bildvarianter innerer Orientierung

Die einzelnen Kameraparameter werden in Abb. 6.16 am Beispiel der 18mm-Einstellung zusammengefasst. Die Werte für c, x'_0 und y'_0 stellen dabei Mittelwerte über die gesamte Bildreihe dar.

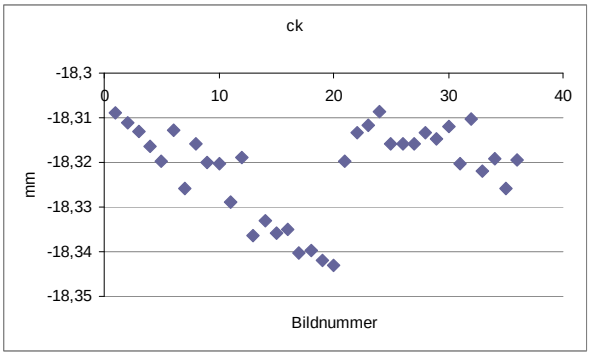
Abb. 6.17 zeigt die Änderungen von Bildhauptpunkt und Kamerakonstante über die Aufnahmeserie für die 18mm-Einstellung. Deutlich ist zu erkennen, dass aufeinander folgende Bilder solange über eine relativ konstante Lage des Projektionszentrums verfügen, bis die Kamera gewälzt (90°-Drehung um optische Achse) wird. Die Verschiebung des Bildhauptpunktes kann dabei eindeutig der Schwerkraftrichtung zugewiesen werden. Für den Bildhauptpunkt variiert die Lage in einem Bereich von ca. 0.25 mm, die Kamerakonstante bewegt sich in einem Bereich von ca. 0.04 mm. Damit wird deutlich, dass der Einfluss einer bildweisen Veränderung des Projektionszentrums für den hier betrachteten Kamera/Objektivtyp nicht vernachlässigt werden darf.



a) Variation des Bildhauptpunktes in x'-Richtung

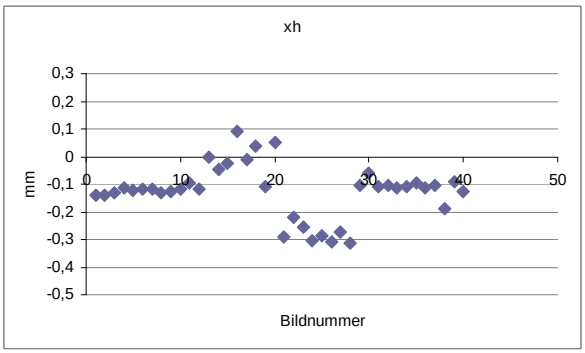


b) Variation des Bildhauptpunktes in y'-Richtung

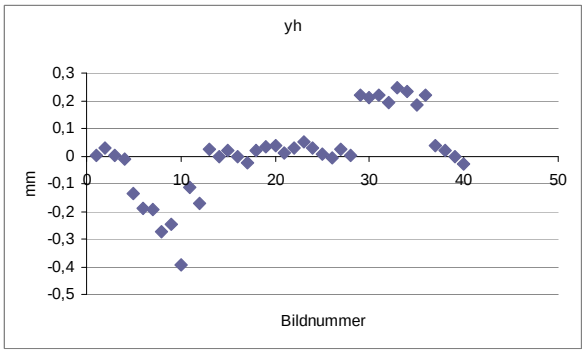


c) Variation der Kamerakonstante

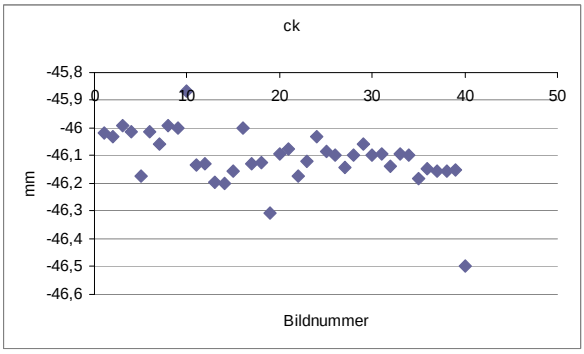
Abb. 6.17: Veränderungen des Projektionszentrums über die Bildaufnahmefolge (Canon EOS1000D, Sigma 18-50mm, f=18mm)



a) Variation des Bildhauptpunktes in x'-Richtung



b) Variation des Bildhauptpunktes in y'-Richtung



c) Variation der Kamerakonstante

Abb. 6.18: Veränderungen des Projektionszentrums über die Bildaufnahmefolge (Canon EOS1000D, Sigma 18-50mm, f=50mm)

Für die maximale Brennweiteneinstellung von 50 mm stellt Abb. 6.18 die berechneten Variationen des Projektionszentrums dar. Das Objektiv ist in dieser Einstellung maximal ausgezogen, d.h. Schwerkrafteinflüsse des Objektivs werden maximal. Die Verschiebungen des Bildhauptpunktes liegen in einem Bereich von bis zu 0.4 mm in x-Richtung und 0.65 mm in y-Richtung. Auch die Veränderung der Kamerakonstanten um durchschnittlich 0.4 mm ist deutlich größer als bei der Einstellung mit 18 mm Brennweite.

6.3.2.3 Einführung eines Symmetriepunktes

Wie in Kap. 3.2.4.1 bereits erläutert, fallen in realen Kameras Bildhauptpunkt und Symmetriepunkt der Verzeichnung nicht unbedingt zusammen. Je nach Fertigungsgüte von Objektiv und Kamera ist es möglich, dass diese Punkte signifikant auseinander liegen. Mit dem Bündelausgleichungsprogramm FiBun (Tecklenburg & Luhmann 2001) ist es möglich, den Symmetriepunkt getrennt vom Bildhauptpunkt einzuführen. Dabei wird der Bildhauptpunkt weiterhin als Lotfußpunkt des in der Ausgleichung berechneten Projektionszentrums bestimmt, während radial-symmetrische und tangential-asymmetrische Verzeichnung auf den Symmetriepunkt bezogen definiert werden.

Wie aus Tab. 6.8 ersichtlich wird, kann die erreichte Objektpunktgenauigkeit noch einmal deutlich gesteigert werden. Sie erreicht jetzt bei allen Brennweiten und in allen drei Koordinatenrichtungen RMS-Werte von ca. 10 µm. Dies entspricht einer relativen Präzision von 1:140 000.

Canon EOS 1000D / Sigma 18-50	**f=18mm**	**f=28mm**	**f=38mm**	**f=50mm**
Anzahl Bilder	36	36	36	34
Anzahl Beobachtungen	11612	8204	4930	3566
Anzahl Unbekannte	946	889	754	730
Mittl. Anzahl Strahlen pro Punkt	30.1	23.6	17.5	14.7
Sigma 0	0.00033	0.00047	0.00051	0.00051
Mittlere Bildmessgenauigkeit	0.00031	0.00045	0.00043	0.00050
Mittlerer quadratischer Fehler				
RMS X	0.007	0.009	0.009	0.009
RMS Y	0.007	0.009	0.009	0.009
RMS Z	0.009	0.011	0.011	0.011
Mittlerer Bildmaßstab				
Relative Präzision	1:112 000	1:90 000	1:90 000	1:90 000

Tab. 6.8: Erreichte Genauigkeiten für Canon EOS 1000D mit Vario-Objektiv bei bildvarianter innerer Orientierung mit zusätzlichem Symmetriepunkt

Abb. 6.19 zeigt die gegenseitige Lage von Bildhauptpunkt und Symmetriepunkt im Bildkoordinatensystem für 9 direkt nacheinander aufgenommene Bilder. Mit Ausnahme des Bildes Nr. 5 zeigen die Punkte ähnliche Positionen. Im Durchschnitt liegen Symmetrie- und Hauptpunkt ca. 60 µm auseinander.

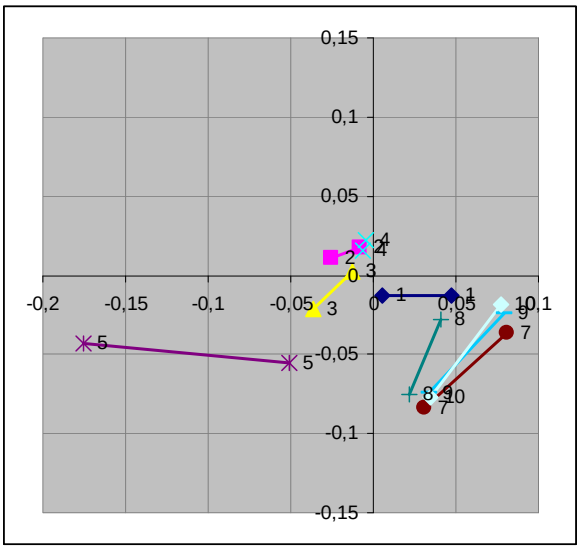


Abb. 6.19: Gegenseitige Lage von Bildhauptpunkt und Symmetriepunkt im Sensorformat (9 Bilder des Verbandes)

6.3.3 Bewertung

Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Untersuchung der Spiegelreflexkamera Canon EOS1000D mit Vario-Objektiv Sigma 18-50mm können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die mechanische Stabilität des Objektivs entspricht nicht üblichen photogrammetrischen Ansprüchen und führt während einer Bildserie zu erheblichen Änderungen der inneren Orientierung. Die Zoomfunktion mit variablen Linsengruppen bewirkt eine signifikante Änderung der optischen Achse sowie stark asymmetrische Verzeichnungsanteile.

- Bündelausgleichungen mit herkömmlicher Kameramodellierung (Standardparameter) ergeben unbefriedigende Messgenauigkeiten. Sie sind mit einer Bildmessgenauigkeit von ca. 1 µm und einer relativen Präzision von ca. 1:40 000 bis 1:63 000 deutlich schlechter als vergleichbare Kameras mit fester Brennweite. Die einzelnen Zoomstufen verhalten sich dabei ähnlich, zeigen jedoch keinen brennweitenabhängigen Trend bezüglich der berechneten Kameraparameter. Die Ursache für die unbefriedigenden Ergebnisse ist in der ungenügenden Kameramodellierung begründet.

- Die Einführung einer bildvarianten Kalibrierung von Kamerakonstante und Bildhauptpunkt führt erwartungsgemäß zu deutlichen besseren Ergebnissen. Die mittlere Bildmessgenauigkeit beträgt ca. 0.5 µm und die relative Präzision verbessert sich auf ca. 1:63 000 bis 1:73 000. Die RMS-Werte der Objektkoordinaten sinken auf ca. 12 µm in XY-Richtung und 16 µm in Z-Richtung. Die bildweise Variation des Projektionszentrums ist bei jeder Zoomstufe unterschiedlich, bedingt durch den veränderten Objektivauszug und die jeweils neue Position einzelner Linsengruppen im Objektiv.

- Die Trennung zwischen Bildhauptpunkt und Symmetriepunkt der Verzeichnung kann signifikant berechnet werden und führt zu einer weiteren Genauigkeitssteigerung. Mit einer Bildmessgenauigkeit von ca. 0.4 µm und RMS-Werten von ca. 8-11 µm in allen Koordinatenrichtungen kann davon ausgegangen werden, dass die optische Abbildung der Kamera bestmöglich modelliert worden ist. Das Ergebnis wird in allen vier getesteten Zoomstufen erreicht. Eine weitere Genauigkeitssteigerung ist vermutlich nicht mehr möglich, da die Objektgenauigkeit in der Größenordnung möglicher äußerer Einflüsse wie der Genauigkeit der Systemmaßstäbe (ca. 5-8 µm) liegt. Weiterhin lässt die Abbildungsqualität der Messpunkte (retro-reflektierende Zielmarken) kaum höhere Messgenauigkeiten im Objektraum zu.

6.4 Fazit

Die Untersuchungen in diesem Kapitel hatten zum Ziel, die Leistungsfähigkeit moderner Digitalspiegelreflexkameras mit verschiedenen Objektiven nachzuweisen und die Abhängigkeit zum jeweils gewählten mathematischen Kameramodell zu untersuchen. Als durchgreifendes Bewertungskriterium wird die nach VDI 2634 Blatt 1 definierte Längenmessabweichung herangezogen. Die hier vorgestellten Ergebnisse für die Kameras mit fester Brennweite stehen in einer Reihe vergleichbarer früherer Untersuchungen (Rautenberg & Wiggenhagen 2002, Hastedt et al. 2006, Rieke-Zapp et al. 2009) und bestätigen die dort publizierten Ergebnisse weitgehend.

Die geometrische Stabilität der untersuchten Kameras fällt unterschiedlich aus. Mit Ausnahme der sehr hochwertigen Sucherkamera Leica M8 wird für alle Kameras ein signifikanter Genauigkeitsgewinn nachgewiesen, wenn eine bildvariante Lage des Projektionszentrums modelliert wird. Die Veränderung des Projektionszentrums geht eindeutig mit der Handhabung der Kamera bei der Aufnahme einher und bestätigt ebenfalls verschiedene publizierte Untersuchungen (Shortis et al. 1998, Maas 1999a, Tecklenburg et al. 2001, Läbe & Förstner 2004, Haig et al. 2006, Rieke-Zapp et al. 2008). Bei vollständiger Kameramodellierung verbleiben Restfehler der gemessenen Bildkoordinaten in der Größenordnung von 0.4 µm, so dass vermutet werden kann, dass hier die derzeitigen physikalischen Grenzen (z.B. Beugung) der Nahbereichsphotogrammetrie erreicht werden.

Die Längenmessabweichung fasst alle in der Messung geprüften Längen zusammen und basiert nicht auf Mittelbildungen oder Standardabweichungen. Sie eignet sich als äußeres Genauigkeitsmaß, stellt Rückführbarkeit auf die Einheit Meter sicher und ist übertragbar auf andere Messverfahren. Die vorgestellten Untersuchungsergebnisse belegen, dass die ermittelten RMS-Werte in der Regel zu optimistisch angegeben werden und insbesondere bei unvollständigen Parametrisierungen ein falsches Bild der tatsächlich erreichten Genauigkeit im Objektraum darstellen. Die Längenmessabweichung reagiert dagegen sehr empfindlich auf veränderte Kameraparametermodelle.

Am Beispiel der Kalibrierung einer Digitalkamera mit Vario-Objektiv wird sichtbar, dass erneut die bildvariante Kalibrierung unerlässlich ist, um eine angemessene Objektgenauigkeit zu erreichen. Die Verfeinerung des mathematischen Kameramodells durch Einführung eines vom Bildhauptpunkt getrennten Autokollimationspunktes (Symmetriepunkt der Verzeichnung) verbessert das Messergebnis deutlich. Die Bauweise des verwendeten Objektivs ist repräsentativ für alle Vario-Objektive und ist aufgrund der beim Zoomen bewegten Linsengruppen für hochgenaue (industrielle) Messaufgaben nur bedingt geeignet.

Zusammenfassend zeigen die aus Literatur und eigenen Untersuchungen erzielten Ergebnisse zu alternativen Kameramodellierungen, dass zukünftig weitere theoretische Untersuchungen notwendig sind, um die numerischen Effekte innerhalb von Bündelausgleichungen und die Wirkungsweise auf die Längenmessabweichung besser zu verstehen. Die oben zusammengefassten Ergebnisse bilden dabei nur einen kleinen Ausschnitt möglicher Aufnahmekonfigurationen und Modellierungen, die zum einen von theoretischem Interesse sind und zum anderen in der Praxis auftreten können. Die Entwicklung handhabbarer (automatischer) Verfahren und Werkzeuge zur Beurteilung der Qualität einer photogrammetrischen Messung, der Erkennung von Über- oder Unterparametrisierungen und letztlich der intelligenten Führung des Operateurs bei Aufnahme und Auswertung von komplexen Bildverbänden bleibt ein offenes und lohnenswertes Ziel in der Nahbereichsphotogrammetrie. Ansonsten sind das Design von Aufnahmekonfigurationen und die Qualitätsanalyse der erzielten Ergebnisse wenigen Fachleuten vorbehalten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über Verfahren der photogrammetrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Im Gegensatz zur Luftbildphotogrammetrie zeichnet sich die Nahbereichsphotogrammetrie durch komplexere und nicht standardisierte Aufnahmesituationen, höchste Genauigkeitsforderungen (im industriellen Bereich), eine Vielzahl von Aufnahmesystemen, verschiedenste Umgebungsparameter und Anforderungen an Echtzeit-, Online- oder Offlineauswertungen aus.

Kamerakalibrierung ist eine der Kernfragen der Photogrammetrie und stets mit der Frage der erzielbaren Messgenauigkeit verbunden. Durch die übliche Integration von Objektvermessung und simultaner Kalibrierung im Rahmen der Bündelausgleichung sind beide Bereiche stark miteinander korreliert. Es liegt daher nahe, die Güte einer Kamerakalibrierung mit unabhängigen Referenzgrößen im Objektraum zu verifizieren. Dieser Ansatz liegt der vorliegenden Arbeit zu Grunde.

Die Definition des Begriffes Kamerakalibrierung, die Einführung wichtiger Parameter und Qualitätsmerkmale, die prinzipiellen Methoden zur Kalibrierung und übergreifende Systemaspekte bilden den Schwerpunkt des ersten Kapitels. Die langjährige Tradition der photogrammetrischen Kalibrierung hat ihre Basis in einer möglichst exakten, aber gleichzeitig mathematisch überschaubaren Modellierung der optischen Abbildung. Dieses Vorgehen ist auch heute noch üblich und verschafft der photogrammetrischen Kameramodellierung einen signifikanten Genauigkeitsvorsprung im Vergleich zu alternativen Modellen, wie sie zum Beispiel im Bereich des Computer Vision entwickelt werden.

Die Abhängigkeit der Kamerakalibrierung von der anwendungsbezogenen oder messsystembedingten Aufnahmesituation wird in Kap. 2 aufgegriffen. Hier wird insbesondere betont, dass die Möglichkeiten zur Simultankalibrierung des Aufnahmesystems beschränkt sind, wenn Online-Messsysteme eingesetzt werden. Des Weiteren wird ein allgemeines schematisches Modell der Einflussgrößen auf die Kalibrierung und damit für die erreichbare Leistungsfähigkeit eines Systems aufgestellt, das die Komplexität der photogrammetrischen Messtechnik im Allgemeinen und der Kamerakalibrierung im Besonderen herausstellt.

Die physikalischen Grundlagen der Kamerakalibrierung wurden in Kap. 3 soweit vertieft, wie sie für das Verständnis der optischen und mathematischen Zusammenhänge erforderlich sind. Ausgehend von Definitionen aus der Wellenoptik werden geometrisch orientierte Aspekte der optischen Abbildung diskutiert. Die Definition des Projektionszentrums, wichtiger Bildbezugspunkte sowie der aus der Optik bekannten Abbildungsfehler sind für die exakte Modellierung der photogrammetrischen Abbildung unerlässlich. Der Abschnitt gibt weiterhin Hinweise für erweiterte Abbildungsmodelle, etwa im Bereich der Farbabbildung, der Strahlverfolgung durch ein Objektiv oder die Einführung eines objektseitigen Projektionszentrums.

In Kap. 4 folgt die Zusammenstellung der photogrammetrischen Standardverfahren zur Kamerakalibrierung. Diese sind seit Jahren in der Praxis eingeführt und haben sich für eine Vielzahl unterschiedlicher Aufnahmesysteme und Sensoren bewährt. Gleichwohl bilden sie in der Regel nur die Abbildungsvorgänge ab, die in qualitativ hochwertigen Objektiven und Kameras bei hinreichender Messgenauigkeit vorkommen.

Erweiterte Modelle der Kamerakalibrierung und der mathematischen Abbildung werden in Kap. 5 diskutiert. Sie umfassen zunächst erweiterte wellenlängenabhängige Abbildungsmodelle, z.B. durch Berücksichtigung der chromatischen Aberration oder beim Strahlverlauf durch verschiedene optische Medien. Die Modellierung des Bildsensors in Form flächenhaft wirkender Korrekturmodelle eröffnet ein neues Feld von Kalibrieransätzen, in denen im Extremfall eine Richtungskorrektur für jedes einzelne Pixel ermittelt werden kann. Schließlich wird das physische Kamerasystem (Gehäuse und Objektiv) näher betrachtet, da es während der Bildaufnahme von äußeren Einflüssen beeinträchtigt werden kann, z.B. in Form mechanischer oder thermischer Deformationen oder durch Schwerkrafteinflüsse. Zu den erweiterten Kameramodellen zählen weiterhin veränderte Abbildungsmodelle, wenn

besondere Objektivformen oder alternative Strahlengänge durch zusätzliche optische Komponenten (z.B. Spiegel oder Prismen) im Aufnahmesystem eingesetzt werden.

Die in Kap. 5 vorgestellten Erweiterungen der Standardverfahren sind zum Teil von hohem praktischen Wert, etwa durch Einführung bildvarianter Kameramodelle oder Beschreibung von Sensordeformationen für Aufnahmesysteme mit geringerer mechanischer Stabilität (Consumerkameras) oder zur Optimierung der Messgenauigkeit bei hochwertigen Systemen. Die einzelnen Modellansätze sind dabei unterschiedlich tief ausgeführt, da sie nur zum Teil vom Autor und seiner Arbeitsgruppe umgesetzt worden sind und durch eigene Erfahrungen und Beispiele untermauert werden können. Dort, wo eigene Entwicklungen einen wesentlichen Beitrag zur Modellbildung und deren Überprüfung bilden, wird vertieft auf die Materie eingegangen und fallweise praktische Auswertebeispiele diskutiert.

In Kap. 6 werden anhand zweier umfangreicher Versuchsserien bisher unveröffentlichte Untersuchungen vorgestellt. Ziel ist dabei jeweils die systematische Variation von Aufnahmesystemen und Modellparametern, wobei die jeweiligen Auswirkungen auf die statistische Präzision und die Genauigkeit im Objektraum verifiziert werden. Hierbei treten teils überraschende Detailergebnisse zutage, es werden aber auch Potenziale erweiterter Modellansätze sichtbar. Durch die hier zugrunde gelegte Bestimmung der Längenmessabweichung gelingt es, unabhängig von statistischen Optimierungen und inneren Genauigkeitsangaben eine fundierte Aussage zur Qualität einer Kamerakalibrierung in Kombination mit der dreidimensionalen Objektrekonstruktion zu machen. Die derzeitige Grenze der Leistungsfähigkeit digitaler photogrammetrischer Messsysteme im Nahbereich kann mit einer Längenmessabweichung angegeben werden, die um ca. Faktor 4 größer als die mittlere Standardabweichung (RMS) der Objektkoordinaten ist.

Das in einer Vielzahl von Publikationen über Jahrzehnte diskutierte Thema der photogrammetrischen Kamerakalibrierung kann hier dennoch nicht allumfassend dargestellt werden. Es bleiben einige Randgebiete und alternative Konzepte, deren Wirkung und Anwendbarkeit noch zukünftig geklärt werden müssen. Darüber hinaus bleibt eine Reihe offener Fragen, die an dieser Stelle ebenfalls nicht abschließend geklärt werden und Raum lassen für weitere Untersuchungen. Dazu gehören Ansätze zur Kalibrierung jeder einzelnen Pixelposition im Bildsensor oder zur Berücksichtigung kompletter Abbildungsstrahlengänge, wie sie die technische Optik beim Design von Objektiven schon lange verwendet. Denkbar sind auch Kalibrierungsansätze, die den Objektraum in Form von Voxel-Korrekturmodellen beschreiben und damit zu einer Optimierung der photogrammetrischen Messgenauigkeit im gesamten Messvolumen beitragen könnten. Schließlich ist noch weitgehend ungeklärt, inwieweit eine Kombination von radiometrischer und geometrischer Kameramodellierung sinnvoll sein kann, die simultan in einem gemeinsamen Rechenprozess analog zur Bündelausgleichung bestimmt werden könnte.

Das in Kap. 2.2 entwickelte allgemeine Kalibrierungsmodell stellt den Versuch dar, alle an der photogrammetrischen Messung beteiligten Komponenten und Umgebungsparameter zusammenzufassen und zu strukturieren. Dieses Modell zeigt prinzipiell auf, an welchen Schnittstellen Wechselwirkungen einzelner Einflussgrößen zu erwarten sind. Viele dieser Einflussgrößen sind bisher nicht weiter in ein mathematisches Modell der Kalibrierung eingeflossen, so dass systematische Modellbildungen und Untersuchungen in Zukunft erforderlich sein werden, um den gesamten Prozess der hochgenauen photogrammetrischen Messtechnik im Nahbereich besser zu verstehen und die Leistungsfähigkeit von Sensoren und Verfahren weiter zu steigern.

8 Literatur

Ackermann, F., Ebner, H., Klein, H., 1970: Ein Rechenprogramm für die Streifentriangulation mit unabhängigen Modellen. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 4/1970, pp. 206-217.

Albertz, J., 2007: Einführung in die Fernerkundung. 3. Aufl., Wichmann Verlag, Heidelberg.

Albertz, J., Wiggenhagen, M., 2009: Photogrammetrisches Taschenbuch. 5. Aufl., Wichmann Verlag, Heidelberg.

d'Apuzzo, N., 2003: Surface Measurement and Tracking of Human Body Parts from Multi Station Video Sequences. Dissertation, ETH Zürich, Nr. 15271.

Atkinson, K.B. (ed.), 1996/2001: Close-Range Photogrammetry and Machine Vision. Whittles Publishing, Caithness, UK.

Bauer, H., Müller, J., 1972: Height accuracy of blocks and bundle adjustment with additional parameters. Presented paper, Comm. III, ISP Congress, 1972.

Berndt, M., Tutsch, R., 2003: Optischer 3D-Sensor zur räumlichen Positionsbestimmung bei der Mikromontage. In: Applied Machine Vision, Stuttgart, pp. 111-118.

Beyer, H., 1992: Geometric and radiometric analysis of a CCD-camera based photogrammetric close-range system. Mitteilungen Nr. 51, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.

Bösemann, W., 1996: The optical tube measurement system OLM – photogrammetric methods used for industrial automation and process control. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 31, B5, pp. 55-58.

Brandstätter, G., 2001: Über projektiv-geometrische Grundlagen der Stereophotogrammetrie. In: Seyferth (Ed.), Publikationen der DGPF, Band 10, Konstanz, pp. 281-288.

Brown, D.C., 1956: The simultaneous determination of the orientation and lens distortion of a photogrammetric camera. RCA Data Reduction Technical Report, No. 33, AFMTC-TN-56-20, ASTIA Document No. 96626.

Brown, D.C., 1958: A solution to the general problem of multiple station analytical stereotriangulation. RCA Data Reduction Technical Report No. 43, Aberdeen.

Brown, D.C., 1966: Decentering distortion of lenses. Photogrammetric Engineering, 22, pp. 444-462.

Brown, D.C., 1971: Close-range camera calibration. Photogrammetric Engineering, 37(8), pp. 855-866.

Brown, D.C., 1976: The bundle adjustment – progress and prospectives. International Archives of Photogrammetry, 21 (3), ISP Congress, Helsinki, pp. 1-33.

Brown, D.C., 1984: A large format, microprocessor controlled film camera optimized for industrial photogrammetry. XV. International Congress of Photogrammetry and Remote Sensing, Comm. V, 29p.

Brown, D.C., Davis, R.G., Johnson, F.C, 1964: The practical and rigorous adjustment of large photogrammetric nets. DBA Systems, Inc., Melbourne, Florida, USA.

Buchholtz, A., 1960: Photogrammetrie. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.

Chapman, D., Kotowski, R., 2000: Methodology for the construction of large image archives of complex industrial structures. Publikationen der DGPF, Band 8, Essen 1999.

Cronk, S., Fraser, C.S., Hanley, H., 2006: Automated metric calibration of colour digital cameras. The Photogrammetric Record, 21 (116), pp. 355-372.

DIN 1319: Grundlagen der Messtechnik; Teil 1, Grundbegriffe. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag GmbH, Berlin-Wien-Zürich.

DIN 18709: Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen im Vermessungswesen. Teil 4, Ausgleichungsrechnung und Statistik. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag GmbH, Berlin-Wien-Zürich.

DIN 18716: Photogrammetrie und Fernerkundung. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag GmbH, Berlin-Wien-Zürich.

Dold, J., 1997: Ein hybrides photogrammetrisches Industriemeßsystem höchster Genauigkeit und seine Überprüfung. Dissertation, Heft 54, Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr, München.

Dorrer, E., 1998: Einsatz der IMP-Stereokamera beim Mars Pathfinder. In List (ed.): Publikationen der DGPF, Band 6, pp. 259-270.

Ebner, H., 1976: Self-calibrating bundle adjustment. Invited paper, International Archives for Photogrammetry, Comm. III, Helsinki.

El-Hakim, S., 1986: Real-time image metrology with CCD cameras. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 52, No. 11, pp. 1757-1766.

Faugeras, O., 1993: Three-Dimensional Computer Vision. The MIT Press, Cambridge, USA.

Finsterwalder, R., 1939: Photogrammetrie. Walter de Gruyter & Co., Berlin.

Förstner, W., 2000: Moderne Orientierungsverfahren. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, Heft 3, pp. 163-176.

Förstner, W., Wrobel, B., 2004: Mathematical concepts in photogrammetry. In McGlone et al. (ed.): Manual of Photogrammetry, pp. 15-181.

Fraser, C.S., 1980. Multiple focal setting self-calibration of close-range metric cameras. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 46(9), pp. 1161-1171.

Fraser, C.S., Brown, D.C., 1986: Industrial photogrammetry – new developments and recent applications. The Photogrammetric Record 12 (68).

Fraser, C.S., Shortis, M., 1992: Variation of distortion within the photographic field. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 58, No. 6, pp. 851-855.

Fraser, C.S., 1996: Network design. In Atkinson (ed.): „Close Range Photogrammetry and Machine Vision“. Whittles Publishing, Caithness, UK, pp. 256 281.

Fraser, C. S., Woods, A. and Brizzi, D., 2005. Hyper redundancy for accuracy enhancement in automated close range photogrammetry. The Photogrammetric Record, 20(111), pp. 205–217.

Fraser, C.S., Al-Ajlouni, S., 2006: Zoom-dependent camera calibration in digital close-range photogrammetry. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 72(9), pp. 1017-1026.

Frost, D., 2008: Implementierung und Vergleich von Methoden zur Kamerakalibrierung für ein Stereomesssystem. Unveröfftl. Diplomarbeit, Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven.

Fryer, J.G., 1986. Distortion in zoom lenses. Australian Journal of Geodesy. Photogrammetry and Surveying, 44, pp. 49-59.

Fryer, J.G., 1989: Camera calibration in non-topographic photogrammetry. In Karara (ed.): Non-Topographic Photogrammetry. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 59-69.

Fryer, J.G., 1996: Camera calibration. In Atkinson (ed.): Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Whittles Publishing, Caithness, UK, pp. 156 – 179.

Fryer, J.G., Brown, D.C., 1986: Lens distortion for close-range photogrammetry. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 52(1), pp. 51-58.

Fryer, J.G., Fraser, C.S., 1986: On the calibration of underwater cameras. The Photogrammetric Record, 12 (67), pp. 73-85.

Gast, P., 1930: Vorlesungen über Photogrammetrie. Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig.

Godding, R., 1993: Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Heft 2/1993, pp. 82-90.

Godding, R., Luhmann, T., 1992: Calibration and accuracy assessment of a multi-sensor online-photogrammetric system. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29/5, Washington, pp. 24-29.

Grün, A., 1978: Experiences with self-calibrating bundle adjustment. ACSM-ASP Annual Meeting, Washington D.C.

Gülch, E., Cramer, M., 2004: Kalibrierung von digitalen Luftbildkameras. Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 5, pp. 289-297.

GUM, 1993: ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM).

Hådem, I., Åmdal, K., 1992: High precision calibration of close range photogrammetry systems. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29/5, Washington, pp. 568-574.

Haferkorn, H., 2003: Optik. 4. Aufl., Wiley-VCH, Berlin, 802 p.

Haig, C., Heipke, C., Wiggenhagen. M., 2006: Lens inclination due to instable fixings detected and verified with VDI/VDE 2634. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 36/5, pp.

Hakkarainen, J., 1985: Radiale Verzeichnung und die Komponenten der Dezentrierungsverzeichnung in modernen Luftbildkameras. In Kupfer/Wester-Ebbinghaus (ed.): Kammerkalibrierung in der photogrammetrischen Praxis, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft Nr. 275, pp. 15-24.

Hartley, R., Zisserman, A., 2000: Multiple View Geometry. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Hastedt, H., Luhmann, T., Tecklenburg, W., 2002: Image-variant interior orientation and sensor modelling of high-quality digital cameras. ISPRS Symposium Comm. V, Korfu.

Hastedt, H., 2004: Monte-Carlo simulation in close-range photogrammetry. Proceedings 20th ISPRS Congress, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol. 35, Istanbul, Turkey.

Hastedt, H., Luhmann, T., Tecklenburg, W., 2006: Modellierung der chromatischen Aberration in Bildern digitaler Aufnahmesysteme. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, Heft 5, pp. 417-425.

Hellmeier, H.-J., 1983: Fisheye-Objektive in der Nahbereichsphotogrammetrie – Theoretische und praktische Untersuchungen. Dissertation, TU Braunschweig, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 286.

Hennes, M., 2007: Konkurrierende Genauigkeitsmaße – Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 4, pp. 136-146.

Hildebrandt, G., 1996: Fernerkundung und Luftbildmessung. Wichmann Verlag, Heidelberg.

Hinsken, L., 1989: CAP: Ein Programm zur kombinierten Bündelausgleichung auf Personalcomputern. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Heft 3, pp. 92-95.

Hofmann, O., 2005: Calibration and georeferencing of aerial digital cameras. In Fritsch (ed.): Photogrammetric Week '05, Wichmann Verlag, pp.105-109.

Höhle, J., 1971: Zur Theorie und Praxis der Unterwasser-Photogrammetrie. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 163.

Holst, G.C., 1996: CCD Arrays, Cameras and Displays. SPIE Press, JCD Publishing, USA.

Huffman, R.E., 1992: Atmospheric Ultraviolet Remote Sensing. Academic Press, London.

ISO 10360-2: Koordinatenmesstechnik - Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Koordinatenmessgeräten. Beuth Verlag, Berlin.

Jacobs, C., 2004: Digitale Panoramen. Springer Verlag, Berlin, 236p.

Jacobsen, K., 1980: Vorschläge zur Konzeption und zur Bearbeitung von Bündelblockausgleichungen. Dissertation, Universität Hannover.

Jantos, R., Luhmann, T., Peipe, J., Schneider, C.-T., 2002: Photogrammetric Performance Evaluation of the Kodak DCS Pro Back. ISPRS Symposium Comm. V, Korfu, 2002.

Kager, H., 1989: Orient: a universal photogrammetric adjustment system. In Gruen/Kahmen (ed.): Optical 3-D Measurement Techniques, Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 447-455.

Kaufmann, V., Ladstädter, R., 2005: Elimination of color fringes in digital photographs caused by lateral chromatic aberration, XXth International CIPA Symposium.

Kenefick, J.F., Gyer, M.S., Harp, B.F., 1972: Analytical self-calibration. Photogrammetric Engineering, Vol. 38, No. 11, pp. 1117-1126.

Kölbl, O., 1975: Tangential and asymmetric lens distortion determined by self-calibration. Bildmessung und Luftbildwesen 43, Heft 1, pp. 35-42.

Koppe, C., 1889: Die Photogrammetrie oder Bildmesskunst. Verlag der deutschen Photographenzeitung, Weimar.

Kotowski, R., 1984: Zur Réseaukorrektur von systematischen Bildfehlern. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 2, pp. 96-101.

Kotowski, R., 1987: Zur Berücksichtigung lichtbrechender Flächen im Strahlenbündel. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 330.

Kraus, K., 2000: Photogrammetrie, Band 3, Topographische Informationssysteme, Dümmler Verlag, Bonn, p. 188ff.

Kraus, K., 2004: Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Walter de Gruyter, Berlin, 516 p.

Kruck, E., 1983: Lösung großer Gleichungssysteme für photogrammetrische Blockausgleichungen mit erweitertem funktionalem Modell. Dissertation, Universität Hannover.

Kyle, S.A., 1990: A modification to the space resection. Allgemeine Vermessungsnachrichten, International Edition, 7/1990, pp. 17 25.

Kupfer, G., Wester-Ebbinghaus, W. (ed.), 1985: Kammerkalibrierung in der photogrammetrischen Praxis. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft 275.

Läbe, T., Förstner, W., 2004: Geometric stability of low-cost digital consumer cameras. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 35(1), pp 528-535, Istanbul, Turkey.

Lenz, R.K., 1987: Linsenfehlerkorrigierte Eichung von Halbleiterkameras mit Standardobjektiven für hochgenaue 3D-Messungen in Echtzeit. Informatik-Fachberichte 149, Springer Verlag, Berlin.

Loser, R., Luhmann, T., 1992: The programmable optical 3 D measuring system POM – applications and performance. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, B5, Comm. V, Washington, pp. 533-540.

Luhmann, T., Wendt, K., 2000: Recommendations for an acceptance and verification test of optical 3-D measurement systems. International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33/5, pp. 493-499.

Luhmann, T., 2003: Nahbereichsphotogrammetrie. 2. Aufl., Wichmann Verlag, Heidelberg, 570p.

Luhmann, T., Tecklenburg, W., 2004: 3-D object reconstruction from multiple-station panorama imagery. ISPRS Panoramic Photogrammetry Workshop, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 34, Part 5/W16, pp. 39-46.

Luhmann, T., Godding, R., 2004: Messgenauigkeit und Kameramodellierung– Kernfragen der Industriephotogrammetrie. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, Heft 1/2004, S. 13-21.

Luhmann, T., 2005a: On the determination of objects rotation and translation in 3-D space (6 DOF) by a single camera. Optical 3-D Measurement Techniques, Zurich, 2005.

Luhmann, T., 2005b: Zum photogrammetrischen Einsatz von Einzelkameras mit optischer Stereostrahlteilung. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, Heft 2/2005, pp. 101-110.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I., 2006: Close Range Photogrammetry. Whittles Publishing, 500p.

Luhmann, T., 2009: Precision potential of photogrammetric 6 DOF pose estimation with single images. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 64/3, pp 275-284.

Maas, H.-G., 1995: New developments in multimedia photogrammetry. In Gruen/Kahmen (ed.): Optical 3-D Measurement Techniques III, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 91-97.

Maas, H.-G., 1999a: Ein Ansatz zur Selbstkalibrierung von Kameras mit instabiler innerer Orientierung. Publikationen der DGPF, Band 7, München 1998.

Maas, H.-G., 1999b: Image sequence based automatic multi-camera system calibration techniques. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, No. 5-6, pp. 352-359.

Marchesi, J.J., 1985: Photokollegium 1-5. Verlag Photographie, Schaffhausen.

Marchesi, J.J., 2002: Digital Photokollegium 1-2. Verlag Photographie, Gilching.

Mason, S.O., 1994: Expert system-based design of photogrammetric networks. Dissertation, Mitteilungen Nr. 53, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.

Mauelshagen, L., 1977: Teilkalibrierung eines photogrammetrischen Systems mit variabler Paßpunktanordnung und unterschiedlichen deterministischen Ansätzen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 236.

McGlone, J.C. (ed.), 2004: Manual of Photogrammetry. 5th edition, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

Meier, H.-K., 1976: Über die geometrische Genauigkeit von Luftbildkammern. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 2, pp. 89-103.

Meißner, U.F., Maurial, A., 2008: Die Methode der finiten Elemente: Eine Einführung in die Grundlagen, Springer Verlag, Berlin.

Meydenbauer, A., 1912: Handbuch der Messbildkunst. Knapp, Halle, 245p.

Mikhail, E.M., Bethel, J.S., McGlone, J.C., 2001: Introduction to Modern Photogrammetry. John Wiley & Sons, New York.

Möser et al. (ed.), 2000: Handbuch Ingenieurgeodäsie, Grundlagen, Wichmann Verlag, Heidelberg, 642p.

Mostafa, M.M.R., 2003: Design and performance of the DSS. In Fritsch (ed.): Photogrammetric Week '03, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 77-87.

Munji, R.A.H., 1986a: Self-calibration using the finite element approach. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 52, No. 3, pp. 411-418.

Munji, R.A.H., 1986b: Calibrating non-metric cameras using the finite element method. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 52, No. 8, pp. 1201-1205.

MVTec, 2007: MVtec Software GmbH: Halcon 8.0 Solution Guide II-F – 3D Machine Vision.

Parian, J.A., Grün, A., 2004: A refined sensor model for panoramic cameras. ISPRS Panoramic Photogrammetry Workshop, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 34, Part 5/W16, pp. 27-38.

Parian, J.A., Grün, A., Cozzani, A., 2006: High accuracy space structures monitoring by a close-range photogrammetric network. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 36/5, pp. 236-241.

Pedrotti, F., Pedrotti, L., Bausch, W., Schmidt, H., 2002: Optik für Ingenieure - Grundlagen. Springer Verlag, Berlin, 846p.

Peipe, J., Tecklenburg, W., 2009: Zur Bestimmung des Bildhauptpunktes durch Simultankalibrierung. In: Luhmann/Müller (eds.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 340-347.

Pérez, J.-P., 1996: Optik. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Putze, T., 2005: Geometric modelling and calibration of a virtual four-headed high speed camera-mirror system for 3-D motion analysis. In: Grün/Kahmen (eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VII. Vol. II, Institute of Geodesy and Geophysics, TU Vienna, pp. 167-174.

Raguse, K., Luhmann, T., 2006: Einsatz der dynamischen Photogrammetrie bei Fußgängerschutzversuchen in der PKW-Entwicklung. In: Luhmann/Müller (eds.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der 5. Oldenburger 3D-Tage, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 10-17.

Rautenberg, U, Wiggenhagen, M., 2002: Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI 2634, Blatt1. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, Heft 2, pp. 117-124.

Regensburger, K., 1990: Photogrammetrie – Anwendungen in Wissenschaft und Technik. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.

Remondino, F., Fraser, C.S., 2006: Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 36/5, pp. 266-272.

Rieke-Zapp, D., Peipe, J., Tecklenburg, W., 2008: Schrauben, kitten, kleben – zur Stabilität digitaler Kameras. In Luhmann/Müller (ed.): Photogrammetrie – Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 63-70..

Rieke-Zapp, D., Tecklenburg, W., Peipe, J., Hastedt, H., Haig, C., 2009: Evaluation of the geometric stability and the accuracy potential of digital cameras – Comparing mechanical stabilisation versus parametrisation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 64/3, pp 248-258.

Robson, S., Shortis, M., Ray, S., 1999: Vision metrology with super wide angle and fish-eye optics. Videometrics VI, SPIE Vol. 3641, pp. 199-206.

Rohrberg, K., 2009: Geschlossene Lösung für den räumlichen Rückwärtsschnitt mit minimalen Objektinformationen. In Luhmann/Müller (ed.): Photogrammetrie – Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 332-339.

Satzger, W., Zenzinger, G., Carl, V, 2006: Quantitative 3D–Thermography. Report European Project VERDICT (2003 - 2006).

Schlüter, M., 1999: Von der 2½D- zur 3D-Flächenmodellierung für die photogrammetrische Rekonstruktion im Objektraum. Dissertation, TU Darmstadt, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 506.

Schmid, H., 1958: Eine allgemeine analytische Lösung für die Aufgabe der Photogrammetrie. Bildmessung und Luftbildwesen, pp. 103-113.

Schneider, C. T., 1991: Objektgestützte Mehrbildzuordnung. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 375.

Schneider, D., Maas, H.-G., 2003: Geometrische Modellierung und Kalibrierung einer hochauflösenden digitalen Rotationszeilenkamera. Luhmann (ed.): Photogrammetrie – Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Wichmann Verlag, pp. 57-64.

Schneider, D., 2008: Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten. Dissertation, Technische Universität Dresden.

Schneider, D., Schwalbe, E., Maas, H.-G., 2009: Validation of geometric models for fisheye lenses. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 64/3, pp 259-266.

Schöler, H., 1981: Production of photogrammetric stereo pairs by beam division in single-lens cameras. Kompendium Photogrammetrie, Vol. XV, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, pp. 77-86.

Schreer, O., 2005: Stereoanalyse und Bildsynthese, Springer Verlag, Berlin, 278p.

Schröder, G., 1990: Technische Optik. Kamprath Reihe, Vogel Verlag, Würzburg.

Schröder, G., Treiber H., 2007: Technische Optik. 10. Auflage, Kamprath Reihe, Vogel Business Media, Würzburg, 348p.

Schulte, M., Bothe, T., Li., Gesierich, A., von Kopylow, C., Jüptner, W., 2006: Hochauflösende Sichtstrahlkalibrierung für optisch abbildende Systeme am Beispiel der Streifenprojektion. In Luhmann/Müller (ed.): Photogrammetrie – Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 130-138.

Schwalbe, E., Maas, H.-G., 2006: Ein Ansatz zur Elimination der chromatischen Aberration bei der Modellierung und Kalibrierung von FishEye-Aufnahmesystemen. In Luhmann (ed.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 122-129.

Schwenke, H., Wäldele, F., Wendt, K., 1997: Überwachung und Meßunsicherheit von optischen 3D-Meßsystemen. GMA-Bericht 30, Optische Formerfassung, Langen, pp. 271-280.

Schwidefsky, K., 1942: Einführung in die Luft- und Erdbildmessung. B.G. Teubner, Berlin.

Schwidefsky, K., Ackermann, F., 1976: Photogrammetrie. B.G. Teubner, Stuttgart.

Shortis, M.R., Robson, S., Beyer, H.A., 1998: Principal point behaviour and calibration parameter models for Kodak DCS cameras. Photogrammetric Record, 16(92): pp. 165-186.

Shortis, M.R., Bellman, C.J., Robson, S., Johnston, G.J., Johnson, G.W., 2006: Stability of zoom and fixed lenses used with digital SLR cameras. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 36/5, Dresden, pp. 285-290.

Tecklenburg, W., Luhmann, T., 2001: Kameramodellierung mit bildvarianten Parametern und finiten Elementen. Publikationen der DGPF, Band 9.

Tecklenburg, W., Luhmann, T., Hastedt, H., 2001: Camera modelling with image-variant parameters and finite elements. In Gruen/Kahmen (ed.): Optical 3-D Measurement Techniques V, Wichmann Verlag, Heidelberg.

Tempelmann, U., Hinsken, L., Recke, U., 2003: ADS40 calibration and verification process. Optical 3-D Measurement Techniques.

Triggs, B., McLauchlan, P. Hartley, R., Fitzgibbon, A., 1999: Bundle adjustment - a modern synthesis. ICCV '99, Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms, Springer, Berlin, pp. 298-372.

Tsai, R.Y., 1986: An efficient and accurate camera calibration technique for 3-D machine vision. Proc. International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, USA, pp. 364-374.

VDI/VDE 2617: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung. VDI/VDE-Richtlinie, Blatt 1-6, Beuth Verlag, Berlin.

VDI/VDE 2634: Optische 3D-Messsysteme. VDI/VDE-Richtlinie, Blatt 1-2, Beuth Verlag, Berlin.

Watt, A., 2002: 3D-Computergrafik. Verlag Pearson Studium, München, 610 p.

Weisensee, M., 1992: Modelle und Algorithmen für das Facetten-Stereosehen. Dissertation, TU Darmstadt, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 374.

Wester-Ebbinghaus, W., 1983a: Ein photogrammetrisches System für Sonderanwendungen. Bildmessung und Luftbildwesen Heft 3/1983, pp. 118-128.

Wester-Ebbinghaus, W., 1983b: Einzelstandpunkt-Selbstkalibrierung – ein Beitrag zur Feldkalibrierung von Aufnahmekammern. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 289.

Wester-Ebbinghaus, W., 1985a: Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen. Zeitschrift für Vermessungswesen, 110 (3), pp. 101-111.

Wester-Ebbinghaus, W., 1985b: Verfahren zur Feldkalibrierung von photogrammetrischen Aufnahmekammern im Nahbereich. In Kupfer/Wester-Ebbinghaus (ed.): Kammerkalibrierung in der photogrammetrischen Praxis, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft Nr. 275, pp. 106-114.

Wester-Ebbinghaus, W., 1989: Das Réseau im photogrammetrischen Bildraum. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Heft 3/1989, pp. 3-10.

Wiley, A.G., Wong, K.W., 1995: Geometric calibration of zoom lenses for computer vision metrology. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 61(1), pp. 69-74.

Wiora, G., Babrou, P., Männer, R., 2004: Real time high speed measurement of photogrammetric targets. In: Rasmussen et al. (Eds.), Pattern Recognition, Springer, Heidelberg, pp. 562-569.

Wrobel, B., 1987: Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 3/1987, pp. 93 101.

Abkürzungen

A/D	analog-to-digital
ADC	analog-to-digital converter (Analog-Digital-Wandler)
CCD	charge coupled device
CMOS	complementary metal oxide semi-conductor
DGPF	Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLT	Direkte lineare Transformation
GaAs	Galliumarsenid: chemische Verbindung aus Gallium (Ga) und Arsen (As) als Material für thermische Bildsensoren
Ge	Germanium
GPS	global positioning system
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
IHS	intensity, hue, saturation
ISO	International Organization for Standardization
InSb	Indiumantimonid: chemische Verbindung aus Indium (In) und Antimon (Sb) als Material für thermische Bildsensoren
PbS	Bleisulfid: chemische Verbindung aus Blei (Pb) und Schwefel (Se) als Material für infrarot-empfindliche Bildsensoren
PbSe	Bleiselenid: chemische Verbindung aus Blei (Pb) und Selen (Se) als Material für infrarot-empfindliche Bildsensoren
PSF	point spread function (Punktverwaschungsfunktion)
QWIP	Quantum Well Infrared Photodetectors
RGB	Rot, Grün, Blau
RMS	root mean square (mittlerer quadratischer Fehler)
Si	Silizium
SNR	signal-to-noise ratio (Signal-Rausch-Verhältnis)
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik
VDI	Verband deutscher Ingenieure

Danksagung

Die vorliegende Habilitationsschrift fasst einen Teil meiner mehr als fünfundzwanzigjährigen Tätigkeit in der Nahbereichsphotogrammetrie zusammen. Seit Mitte der 1980er Jahre haben mich viele Menschen auf diesem Weg begleitet, die einen wesentlichen Anteil an den beruflichen und persönlichen Entwicklungen hatten. All den Freunden und Kollegen danke ich sehr für die Unterstützung und Begleitung.

Ganz besonderen Anteil an dieser Arbeit haben die Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen des Instituts für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik der Fachhochschule in Oldenburg. Hier danke ich vor allem Werner Tecklenburg und Heidi Hastedt, die mit ihren wissenschaftlichen und praktischen Arbeiten zur Kameramodellierung einen wesentlichen Grundstein für die am IAPG vorhandene Kompetenz gelegt und zahlreiche Beispiele für diese Arbeit beigesteuert haben. Danken möchte ich auch der Photogrammetrie-Gruppe mit Folkmar Bethmann, Benjamin Herd, Dennis Jansen, Anna Meyer, Christina Müller, Julia Ohm, Johannes Piechel, Hans-Peter Ratzke, Janine Tast, Andreas Voigt und Manfred Weisensee für die fortwährende Hilfe und Entlastung.

Während des Schreibens dieser Arbeit und der Durchführung systematischer Testfeldkalibrierungen und Bündelausgleichungen verstarb überraschend im Juni 2009 mein engster Mitarbeiter Werner Tecklenburg. Die mit ihm verbundenen Entwicklungen, insbesondere in der Panoramaphotogrammetrie und der alternativen Modellierung der inneren Orientierung, haben einen wesentlichen Einfluss auf die Arbeiten der letzten Jahre gehabt. Einige der für diese Arbeit geplanten Berechnungen konnten im vorgesehenen Rahmen nicht mehr durchgeführt werden und werden nun Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

Meinem Kollegen Hans-Gerd Maas danke ich sehr für die Motivation und die Übernahme des Hauptreferats sowie für die fachlichen Diskussionen in den letzten Jahren, die immer einen Gewinn für mich dargestellt haben. Auch danke ich den Professoren Christian Heipke und Ralf Reulke für die Betreuung der Arbeit als weitere Gutachter.

Schließlich danke ich meiner Familie dafür, dass sie ich mich immer geduldig und belastbar unterstützt und so manche Abwesenheit erträgt. Meiner Frau Ute danke ich besonders, die nicht nur das kompetente Korrekturlesen vieler meiner Publikationen übernimmt, sondern mit Liebe und Kraft unser gemeinsames Leben gestaltet.

Oldenburg, im Januar 2010